



TITLE:

果菜・根菜類の組織内ガスが柔組織の音響特性に及ぼす影響について(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

西津, 貴久

CITATION:

西津, 貴久. 果菜・根菜類の組織内ガスが柔組織の音響特性に及ぼす影響について. 京都大学, 2002, 博士(農学)

ISSUE DATE:

2002-11-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r11062>

RIGHT:

果菜・根菜類の組織内ガスが柔組織の音響特性に及ぼす影響について

2002

西津貴久

果菜・根菜類の組織内ガスが柔組織の音響特性に及ぼす影響について

2002

西津貴久

目 次

第 1 章 緒論	1
第 2 章 果菜・根菜類柔組織の弾性率と音速.....	10
第 1 節 はじめに.....	10
2.1.1. 農産物の硬さ.....	10
2.1.2. 弾性率と音速.....	13
第 2 節 無限媒体の弾性率と振動伝播速度	14
2.2.1. 無限媒体について.....	14
2.2.2. 平面弾性波伝播理論	14
2.2.3. 果菜・根菜類柔組織の扱い	19
2.2.3.1. 不均一性と等方性	19
2.2.3.2. 応力-歪み関係の線形近似	22
2.2.3.3. 弾性体と粘弾性体	23
2.2.4. 無限媒体中の振動伝播速度から得られる弾性情報.....	30
第 3 節 有限媒体の弾性率と振動伝播速度	32
2.3.1. 有限媒体について.....	32
2.3.2. 等方均一有限媒体の弾性率と振動伝播速度	35
2.3.2.1. 等方均一完全弾性丸棒の場合.....	36
2.3.2.2. 等方均一完全弾性球体の場合.....	41
2.3.3. 果菜・根菜類柔組織の扱い	47
2.3.4. 有限媒体中の振動伝播速度から得られる弾性情報.....	49
第 4 節 まとめ	51
第 3 章 果菜・根菜類の組織内ガスと気泡分散系理論.....	55
第 1 節 はじめに.....	55
第 2 節 果菜・根菜類の柔細胞と柔組織	55
3.2.1. 柔組織の構造	55
3.2.2. 柔組織の化学組成.....	58
3.2.3. 組織内ガス	60
第 3 節 果菜・根菜類の弾性率と音速に及ぼす組織内ガスの影響	65
3.3.1. ガスと水の物性.....	66
3.3.2. 気泡分散系理論	68

3.3.2.1.	気泡分散系モデル	68
3.3.2.2.	みかけの弾性率	68
3.3.2.3.	無限媒体中の振動伝播速度	77
3.3.2.4.	有限媒体中の振動伝播速度	79
第 4 章	縦波超音波振動実験	83
第 1 節	はじめに	83
第 2 節	気泡分散寒天ゲルを用いた実験	84
4.2.1.	実験方法	84
4.2.1.1.	実験試料	84
4.2.1.2.	試料調製法	89
4.2.1.3.	実験装置及び計測方法	92
4.2.2.	結果及び考察	98
4.2.2.1.	計測精度	98
4.2.2.2.	加圧操作の影響	99
4.2.2.3.	大気圧下実験	100
4.2.2.4.	加圧下実験	102
4.2.3.	まとめ	104
第 3 節	果菜・根菜類柔組織を用いた実験	105
4.3.1.	実験方法	105
4.3.1.1.	実験試料及び整形法	105
4.3.1.2.	実験装置及び計測方法	107
4.3.2.	結果及び考察	118
4.3.2.1.	ガス体積分率・密度計測値のばらつき	118
4.3.2.2.	大気圧下実験	119
4.3.2.3.	加圧下実験	121
4.3.2.4.	密度と組織内ガス体積分率	126
4.3.2.5.	気泡分散系理論の適用性	128
第 4 節	まとめ	129
第 5 章	バイモルフ型振動子による低周波振動実験	131
第 1 節	はじめに	131
第 2 節	バイモルフ型振動子による振動励起	132
5.2.1.	バイモルフ型振動子	132
5.2.2.	バイモルフ型振動子を用いた計測	133
5.2.3.	振動伝播速度と弾性率	138
第 3 節	円板状試料片を用いた実験	139

5.3.1.	実験方法	139
5.3.1.1.	実験試料及び整形法	139
5.3.1.2.	実験装置及び計測方法	139
5.3.2.	結果及び考察	144
5.3.2.1.	計測精度	144
5.3.2.2.	気泡分散寒天ゲルを用いた実験	144
5.3.2.3.	果菜・根菜類柔組織を用いた実験	148
5.3.3.	まとめ	152
第 6 章	総括	155
謝辞	159

第1章 緒論

我が国の農業生産が、量より質へ舵をきり始めてからすでに久しい。それに呼応するように、収穫後のいわゆるポストハーベストにおける等級選別、階級選別の自動化、高速化、高精度化が図られ、最近では外食産業やコンビニエンスストアなど食品産業による仕入れ農産物の規格化の流れが、この動きをさらに加速させている。さらに、最近の食生活の多様化と相まって、一般消費者は、農産物の形状、重さ、色合いなどの外観品質のみならず、味、鮮度、熟度などの内部品質を重視するようになってきている。農林水産省と中央果実基金が実施した野菜、果実に関する消費者の年齢別購買意識調査結果を表 1-1 に示す。年齢を

表 1-1 野菜・果実購入時の留意点についての調査結果(複数回答)

野菜購入時の注意点(農林水産省 1996)

(単位:%)

	鮮度や品いた みの程度	品質等	価格	産地や銘柄	健康・自然・天 然・手造り・特 選・有機等の 表示
合計	76.2	36.5	29.3	17.1	16.7
20 代	85.1	19.1	55.3	10.6	10.6
30 代	80.3	28.7	36.1	13.5	16.8
40 代	73.9	39.8	30.7	18.9	15.5
50 代	76.7	36.3	21.3	16.3	20.8
60 歳以上	72.0	45.5	23.2	21.3	14.7

'99 年版農産物流通技術年報(農産物流通技術研究会編, フレッシュフードシステム増刊号第 28 巻)より抜粋。

果実選択時の重視点(中央果実基金 1997)

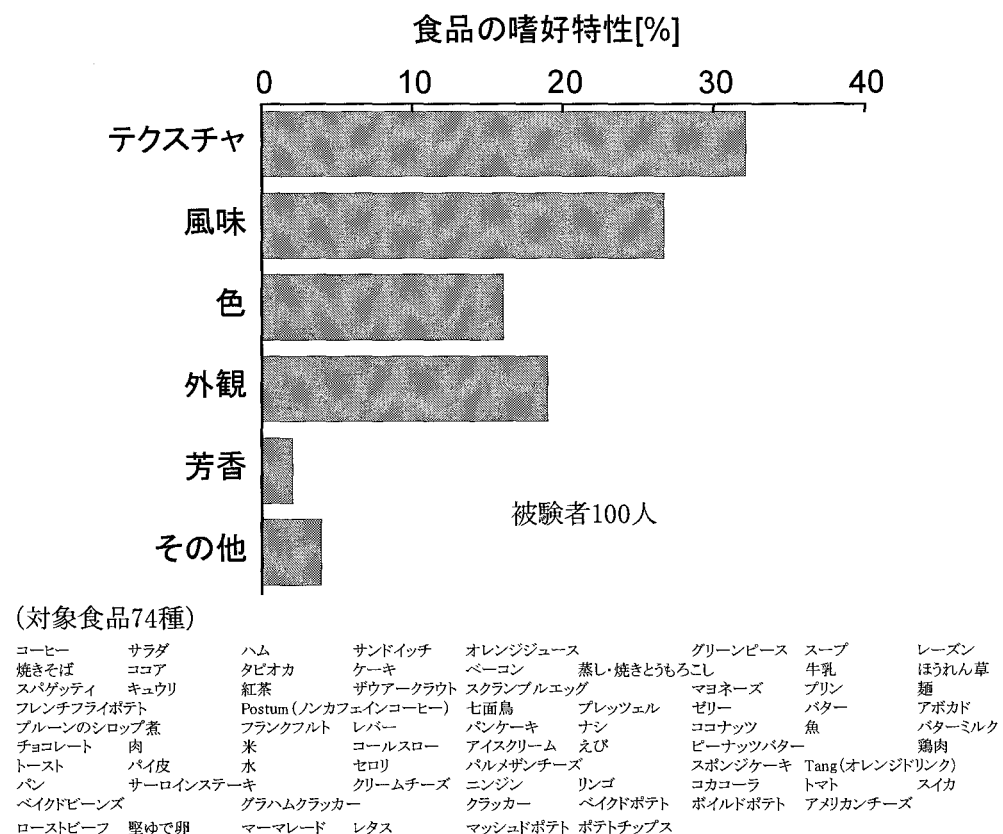
(単位:%)

	価格	産地 銘柄	鮮度	味	大きさ 重量	色・つや	熟度	その他
全体	81.4	20.0	78.1	62.0	11.3	13.8	16.7	2.6
20 代	83.3	22.5	72.5	53.5	16.9	18.3	18.3	2.8
30 代	80.9	16.9	80.0	61.4	11.4	13.4	16.0	2.9
40 代	80.7	24.2	77.9	68.0	7.8	11.9	17.2	2.0

2001 年版農産物流通技術年報(農産物流通技術研究会編, フレッシュフードシステム増刊号第 30 巻)より抜粋。

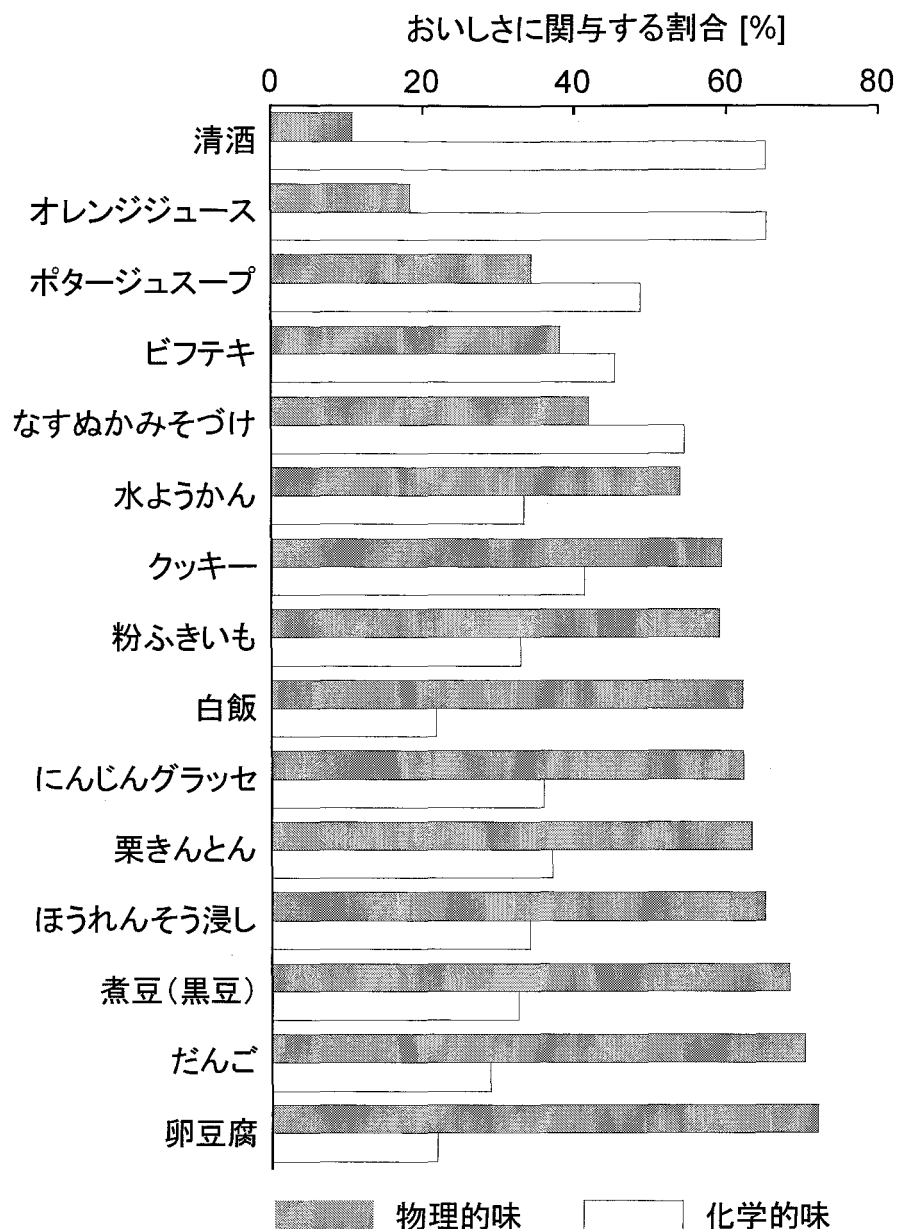
問わず、鮮度・味などの内部品質を価格以上に重視している傾向を読み取ることができる。こうした流れを受けて、農産物の内部品質評価の必要性が増してきている。

農産物の内部品質の中で最も重要なものは呈味成分、つまり果実で言えば糖、有機酸に代表される化学物質の濃度であり、これは近赤外分光法による非破壊計測に関する研究及び実機開発・導入が盛んに行われている¹⁾。一方で、こうした化学的な味とともに人間の口腔内で感知される触感、いわゆるテクスチャも、同等あるいはそれ以上に重要であると考えられている²⁾。Szczesniak³⁾は100人の被験者に74品目の食品を提示して、それらの食品のおいしさを決定する因子についての聞き取り調査を行った。その結果を神山⁴⁾がまとめたものを図1-1に示す。食品のおいしさを左右する最大の要因としてテクスチャが挙げられている。同様に松元ら⁵⁾も30名の調理の専門家を対象に、種々の食べ物の味に寄与すると考えられる要因を心理的なもの、化学的なもの及び物理的なものに分類し、それぞれの寄与率について検討を行った。図1-2は松本²⁾がその研究報告をもとに化学的な味と物理的な味についてまとめたものであるが、物理的な味の寄与が総体的に高いことを示している。これらは主として加工食品についての調査であるが、農産物の生食についてもほぼ同様の傾向にあるものと考えられる。



神山かおる「食品の物性と生理機能」(農業および園芸, 74(1), pp.178-182, 1999)より抜粋。

図 1-1 食品のおいしさを決定する因子



神山かおる「食品の物性と生理機能」(農業および園芸, 74(1), pp.178-182, 1999)より抜粋。

図 1-2 食品のおいしさに対する物理的・化学的な味の影響

このテクスチャを構成する重要な因子の一つは「硬さ」と言われている⁴⁾⁶⁾⁷⁾。硬度は、青果物、特に果実においては、その熟度と密接な関係にあり、果実の成熟の目安とされ⁸⁾、例えば追熟操作を行うキウイフルーツは、選果ラインで硬度による過熟果の判別が実際に行われている⁹⁾。収穫前においても、樹上の果実の硬度を知ることにより適切な収穫時期を決定することもできる¹⁰⁾⁻¹²⁾。さらに硬度選別が可能となれば、生食用と加工用に分けて出荷できるために資源の有効活用が期待できる。

従来農産物の硬度は、手の触感での推定や、Magness-Taylor 硬度計をはじめとする貫入

試験により計測されてきた。しかしこれらの方法は破壊法であるが故に、例えば選果場における収穫物の全品検査などの用途には適さなかった。このため、全品検査を目指してさまざまな非破壊硬度測定の研究・開発がこれまで行われてきており、中には既に実用化されているものもある。

非破壊硬度評価法についても選別機メーカー、公的試験所、大学などで研究・開発が行われてきた。その方式を入力物理量別に分類すると概ね以下ようになる。

- ・ 衝撃荷重法
- ・ 打音解析法
- ・ 超音波法
- ・ 近赤外分光法

衝撃荷重法は、平板への落下衝撃荷重を計測したり¹³⁾⁻¹⁸⁾、プランジャなどの圧子を農産物に傷をつけない程度に押し込んだり衝突させたりしたときの荷重変化を計測する¹⁹⁾⁻²²⁾ことで硬さを推定する方法である。原理的には押し込み量に対する反力が、果肉のヤング率などの弾性率に応じて異なることを利用したものと言える。これは硬さの定義そのものであり、本方式での計測結果は実際の硬度指標として十分に説得力がある。しかし、破壊をしないまでも、農産物の自重程度の衝撃力や押し込み力が作用するために、押せ傷を受けやすい青果物への適用は難しいという問題点がある。

打音解析法は青果物に振動を与えたときに発生する音響振動を解析して品質を測定する方法である。我が国ではスイカを手で叩いた時の音から空洞果や熟度の判定をすることがよく行われてきた。また東南アジアではドリアンの熟度をみるために果柄部を木の棒で打撃した時の音を利用するなど、我が国以外でも青果物の簡易な熟度判定法として用いられてきた。打音解析法はこれを装置化した計測法と言える。打撃音の周波数解析により共振周波数・固有振動数を決定し、この周波数ピークが果肉の軟化とともに低周波数側にシフトしていくことを用いて硬さや熟度を推定するのが一般的な方法である²³⁾⁻³³⁾。しかし共振周波数は果肉硬度だけでなく、青果物のサイズにも影響を受けるため、必ずサイズあるいは質量を同時に計測する必要がある。杉山は、同じ打音法でも、青果物表面付近を伝播する振動音の伝播速度を計測することで、サイズ・質量計測が不要になる方法を提案した¹⁰⁾⁻¹²⁾。貫入抵抗やみかけのヤング率との相関係数が 0.9 以上の高い相関を得ており、実用機の開発が現在行われている。

超音波法は 20kHz 以上の可聴域を超える高周波領域の音響振動を使用するもので、その計測・データ解析方法は打音解析法とほぼ同じと考えてよい。果肉内部での吸収・散乱が大きいために、振動エネルギーの入力効率は可聴域振動よりも劣るが、波長が短いために、高精度な計測が可能であり、超音波音速を用いた農産物の弾性率など力学物性の計測が行われている³⁴⁾⁻³⁵⁾。

近赤外分光法による硬度測定は、細胞壁中のペクチンの可溶化による細胞壁の分解が細胞壁強度を低下させ果肉を軟化させるという点に着目し、ペクチンの組成を近赤外分光法で計測することで硬度を推定する方法であり、既にウメやスモモの硬度計測への適用が

試みられている³⁶⁾⁻³⁸⁾。しかし、ペクチン質のみが果実の硬度を決定する要因ではなく³⁹⁾⁴⁰⁾、また品目ごとにその組成も異なることから、例えば樹上果実の同一個体の生長計測といったモニタリング手法としては有効であると考えられるが、収穫前後の履歴が異なる大量の青果物の硬度選別への適用にはまだ課題が多い。

従って現状では、力に対する応答という硬さの定義に近く、その上青果物に損傷を与える可能性の少ない打音解析法や超音波法などの音響法が、非破壊硬度測定法として優れていると言えよう。中でも、振動速度を測定する方法は、青果物のサイズなど、音響パラメータ以外の因子の影響を排除することができ、実用的な方法であると考えられる。また振動伝播速度の計測は、同じ音響パラメータである吸収係数と比較して、農産物の表面性状の個体差によるセンサー果実間の音響インピーダンス変動の影響が出にくいことも利点の一つとして挙げられる。

図 1-3 に杉山¹¹⁾⁴¹⁾が計測したメロンとナシの振動伝播速度とみかけのヤング率の関係を

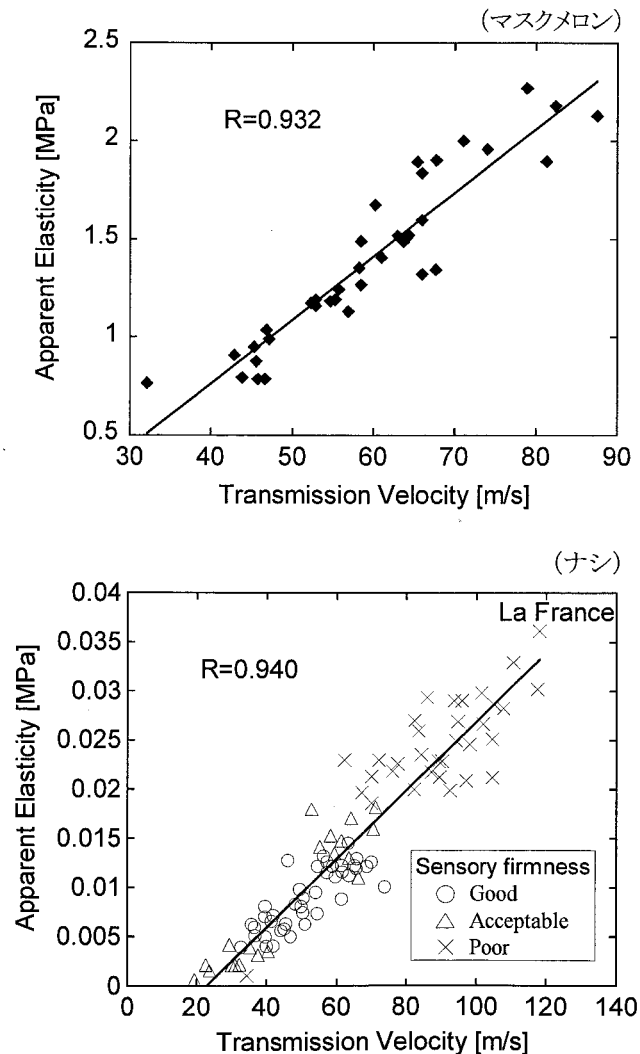


図 1-3 マスクメロン・ナシの振動伝播速度とみかけの弾性率の関係¹¹⁾⁴¹⁾

表 1-2 ダイコンの超音波音速, 密度, 空洞体積, Brix 値, ヤング率間の単相関⁴²⁾

	Velocity	Density	Hollow volume	Brix	Young's modulus
Velocity	1				
Density	0.35**	1			
Hollow volume	-0.426**	-0.716**	1		
Brix	-0.105	0.213	-0.022	1	
Young's modulus	0.36**	0.526**	-0.477	0.164	1
n=0	*: significant $\alpha=0.05$		**: highly significant $\alpha=0.01$		

示す。この相関は高く、伝播速度による硬度計測がある程度可能であることを示している。一方、Luら⁴²⁾がダイコンを用いて 50kHz の超音波の伝播速度とみかけのヤング率を計測した結果(表 1-2)では相関係数が 0.36 となり、杉山のデータと比較して低い結果となっている。このような試料や実験系による相関のばらつきの原因についてこれまで検討されたことはなく、このことが音響法の本格的な実用化を阻む原因の一つであったと考えられる。

本研究では、弾性率—振動伝播速度の相関関係について、超音波法と打音法との間に相異がみられる原因について、振動伝播媒体に関する無限媒体近似、有限媒体中の波動理論を用いた解釈を試み、さらに超音波法で相関が低い原因が農産物内部の組織内ガスの存在にあるとして気泡分散系によるモデル式を提案し、これらの理論について果菜・根菜類柔組織を用いた実験による検証を行った結果についてまとめたものである。

本論文は本章以降、以下のように構成されている。

第 2 章では、農産物の「硬さ」としての弾性率と音速の関係について、無限媒体と有限媒体では理論式がそれぞれ異なることを示し、さらに農産物柔組織への適用の際の留意すべき事項についてまとめた。

第 3 章では、農産物柔組織構造と組織内ガスの発生原因と存在割合について概観し、柔組織を細胞実質という連続相(マトリックス, 母材)中に小さなガス粒子が分散した気泡分散系でモデル化し、無限媒質と有限媒質中での音速、弾性率に与える影響について理論的な考察を行った。

第 4 章では、気泡分散寒天ゲルと果菜・根菜類柔組織を用いて超音波振動伝播速度・弾性率・組織内ガス体積分率の計測を行い、無限媒体近似理論の実験的検証を行った。

第 5 章では、バイモルフ型振動子を用いた低周波振動の励起・検出法について述べ、第 4 章と同様に気泡分散寒天ゲルと果菜・根菜類柔組織を用いて、低周波振動伝播速度、弾性率、組織内ガス体積分率の計測を行い、有限媒体近似理論の実験的検証を行った。

第 6 章では本研究の総括を行う。

参考文献

- 1) 尾崎幸洋, 河田 聡 編 : 日本分光学会測定法シリーズ 32「近赤外分光法」, 学会出版センター, pp.157-172 (1996)
- 2) 松本幸雄 : 食品の物性とは何か, 弘学出版, pp.17-20 (1991)
- 3) Szczesniak A. S. and D. H. Kleyn : Consumer awareness of texture and other food attributes, *Food Technology*, 74, pp.74-77 (1963)
- 4) 神山かおる : 食品の物性と生理機能, 農業および園芸, 74(1), pp.178-182 (1999)
- 5) 松本仲子, 松元文子 : 調理科学, 10(2), pp.46 (1977)
- 6) Mohsenin, N. N. 著, 林 弘通監訳 : 食品の物性, 光琳, pp.298-314 (1982)
- 7) Szczesniak A. S. : Texture measurements, *Food Technology*, 20, 1292-1298, 1966
- 8) 伊藤三郎編 : 果実の科学, 朝倉書店, pp.38-40 (1991)
- 9) 澤田達也, 瀬尾康久, 森嶋 博, 芋生憲司, 川越義則 : キウイフルーツの貯蔵および追熟に関する研究(第1報), 農業機械学会誌, 54(3), pp.61-67 (1992)
- 10) 杉山純一 : メロンの携帯型非破壊果肉硬度計の開発と成長計測, フレッシュフードシステム, 26(9), pp.22-27 (1992)
- 11) Sugiyama, J., Katsurai, T., Hong, J., Koyama, H. and K. Mikuriya. : Melon ripness monitoring by a portable firmness tester, *Transactions of the ASAE*, 41(1), pp.121-127 (1998)
- 12) 杉山純一 : 打音によるメロンの非破壊計測—その原理から携帯用果肉硬度計の開発まで—, 農業及び園芸, 73(2), pp.238-246 (1998)
- 13) Baerdemaeker, J. D., Lemaitre, L. and R. Meire : Quality detection by frequency spectrum analysis of the fruits impact force, *Transactions of the ASAE*, 25(1), pp.175-178 (1982)
- 14) Delwiche, M. J., McDonald, T. and V. Bowers : Determination of peach firmness by analysis of impact forces, *Transactions of the ASAE*, 30(1), pp.249-254 (1987)
- 15) Delwiche, M. J. : Theory of firmness sorting by impact forces, *Transactions of the ASAE*, 30(4), pp.1160-1166 (1987)
- 16) Delwiche, M. J., Tang, S. and J. J. Mehlschau : An impact force response fruit firmness sorter, *Transactions of the ASAE*, 32(1), pp.321-326 (1989)
- 17) 芋生憲司, 森嶋 博, 瀬尾康久, 澤田達也 : 衝撃荷重による果実の硬さ測定に関する研究, 農業機械学会誌, 55(1), pp.67-74 (1993)
- 18) McGlone, V. A., Jordan, R. B. and P. N. Schaare : Mass and drop-height influence on kiwifruit firmness, *Transactions of the ASAE*, 40(5), pp.1421-1428 (1997)
- 19) 中馬 豊, 村田 敏, 宮里 満, 西原明彦 : バネ式果実硬度計による果実及び野菜の弾性率測定法, 農業機械学会誌, 31(3), pp.260-262 (1969)
- 20) 鷹尾宏之進 : 青果物の軟らかさ測定装置(HIT カウンタ), 機械化農業, 2869 号,

pp.26-28 (1990)

- 21) Chen, P., Ruiz-Altisent and P. Barreiro : Effects of impacting mass on firmness sensing of fruits, Transactions of the ASAE, 39(3), pp.1019-1023 (1996)
- 22) Chen, P. : Application of elastic theory to high-speed impact sensing of fruits, the Proceedings of 3rd IFAC/CIGR Workshop on Control Applications in Post-Harvest and Processing Technology, pp.21-26 (2001)
- 23) Yamamoto, H., Iwamoto, M. and S. Haginuma : Acoustic impulse response method for measuring natural frequency of intact fruits and preliminary applications to internal quality evaluation of apples and watermelons, Journal of Texture Studies, 11(2), pp.117-136 (1980)
- 24) 西村 功, 川村恒夫 : 青果物の振動特性と測定法, 農産物性研究(第2集), 農業機械学会編, pp.93-111 (1985)
- 25) 中馬 豊, 志賀 徹, 疋田慶夫 : 振動・衝撃利用による果実の内部品質判定(第1報)—スイカ果実の共振周波数と内部組成—, 農業機械学会誌, 39(3), pp.335-341 (1977)
- 26) 池田善郎 : 農産物の機械的特性の非破壊・実時間測定について, 農産物性研究(第3集), 農業機械学会編, pp.43-55 (1987)
- 27) 池田善郎 : 農業機械のインテリジェント化に関する研究(人口触覚について)—第1報 農産物の動的特性測定装置の試作—, 農業機械学会誌, 46(2), pp.225-232 (1984)
- 28) 池田善郎 : 農業機械のインテリジェント化に関する研究(人口触覚について)—第4報 農産物特性の非物理的パラメータ表現と品質判定への応用—, 農業機械学会誌, 51(1), pp.55-61 (1989)
- 29) 池田善郎 : 農産物の動特性による品質判定法—自己回帰異動平均モデルによる動特性の記述と品質判定への応用—, 農業機械学会誌, 52(2), pp.43-49 (1990)
- 30) 水野雅史, 土田広信, 本郷昭三, 伊地知武吉, 水野 進, 渡辺一憲 : 打音解析によるメロン果実の熟度判定, 園芸学会雑誌, 60(1), pp.83-88 (1991)
- 31) Finney, E. E. Jr. : Dynamic elastic properties of some fruits during growth and development, Journal of Agricultural Engineering Research, 12(4), pp.249-256 (1967)
- 32) Cooke, J. R. and R. H. Rand : A mathematical study of resonance in intact fruits and vegetables using a 3-media elastic sphere model, Journal of Agricultural Engineering Research, 18(1), pp.141-157 (1973)
- 33) Finney, E. E. Jr. and K. H. Norris : Sonic resonant methods for measuring properties associated with texture of Irish and sweet Potatoes, American Society for Horticultural Science, 90, pp.275-282 (1967)
- 34) 法貴 誠 : 大豆の力学的特性に関する研究(第1報)—動的ヤング率とポアソン比—, 農業機械学会誌, 50(6), pp.77-82 (1988)

- 35) 鳥居 徹, 岡本嗣男, 木谷 収 : 超音波を用いた農産物性の研究, 第45回農業機械学会年次大会講演要旨, pp.160 (1986)
- 36) 恩田 匠, 辻 政雄, 小宮山美弘 : 近赤外分光分析法によるスモモ果実の糖度, 酸度および硬度の非破壊計測, 日本食品工業学会誌, 41(12), pp.908-912 (1994)
- 37) 恩田 匠, 小宮山美弘, 乙黒親男 : 近赤外分光法によるスモモ果実の追熟過程の時系列分析, 日本食品工業学会誌, 43(4), pp.382-387 (1996)
- 38) 恩田 匠, 飯野修一, 乙黒親男 : 近赤外分光法によるウメ果実の硬度計測, フレッシュフードシステム, 26(5), pp.2623-2626 (1997)
- 39) 児島清秀 : 果実のかたさと化学的成分[1], 農業および園芸, 74(3), pp.335-339 (1999)
- 40) 児島清秀 : 果実のかたさと化学的成分[2], 農業および園芸, 74(4), pp.452-454 (1999)
- 41) Sugiyama, J. : Application of non-destructive portable firmness tester to pears, Food Science and Technology Research, 7(2), pp.161-163 (2001)
- 42) Lu, F., Shau, G., and F. Chung : Ultrasonic properties of radish under chilling storage, the Proceedings of International Symposium on Agricultural Mechanization and Automation 97, Vol. 2, pp.263-268 (1997)

第2章 果菜・根菜類柔組織の弾性率と音速

第1節 はじめに

2.1.1. 農産物の硬さ

日本語には物質の「かたさ」について、「硬さ」、「堅さ」、「固さ」の三つの表記がある¹⁾。これらは一般にそれぞれ、「軟らかさ」、「脆さ」、「緩さ」に対応する「かたさ」である。鉱物学分野では「硬さ(hardness)」と「堅さ(firmness)」は明確に区別される²⁾。前者は引っかきに対する抵抗(硬度)の指標で、Mohs硬さ、Brinell硬さやVickers硬さに代表されるように圧子や別の鉱物で押し込んだり引っかいたりした場合のくぼみや欠き傷の大きさによってされる。後者は堅牢性(反意として脆性)の意味であるが、硬度のように計測法の規格化は特に図られていない。これに従えば、ガラスはゴムよりも「硬い」が、同時に「堅くない」ということになる²⁾。

一方、金属や高分子材料などの工業用材料では、「硬さ(hardness)」が統一的に用いられている³⁾。その定義については金属学、機械学、高分子材料学などの分野間で若干の相異はあるものの、概括すれば「変形に対する材料の抵抗⁴⁾」となる。変形の与え方、及び抵抗の表し方により、様々な計測方法が使用・提案されており、一部はASTM(アメリカ材料試験協会)、JSA(日本規格協会)等の学協会により規格化されている。

農産物について、Mohsenin⁵⁾は穀類やナッツ類に対して「hardness」を、その他高含水率の果菜類やゼリーなどのゲル体には「firmness」という表現を採用しているが、これは農業工学分野や食品科学分野において定着しているとはいいがたく、実際にはこれらの分野では、「固さ」、「堅さ」、「硬さ」(英語では firmness と hardness)を明確に区別して用いることはほとんどない⁶⁾。従って本論文では以降、「硬さ」に統一して表現することとする。

硬さをはじめとする農産物の力学的性質は、収穫・加工・流通などのポストハーベストにおける加工用機械の設計や機械的損傷の防止の観点から捉えられることが多く、この意味では工業用材料の硬度計測に準じた方法は農産物・食品にとっても極めて有効である。

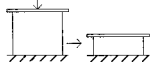


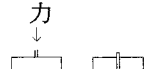


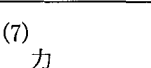
一方で、口腔内で感知される硬さ(sensory firmness/hardness)も、農産物・食品に固有の重要な品質指標である。このような感覚的評価量と客観的な物理量との橋渡しをするために、Szczenniak⁷⁻⁹⁾はテクスチャプロフィール法を提案した。テクスチャとは、口腔内で感知できる食品の物理学的性質、又は触覚、視覚、聴覚によって判断できる食品の組織学的性質のことを言う¹⁰⁾。つまり食品一般の力学的特性である粘性、硬さ、弾性、粘弾性、付着性、凝集性、もろさはもちろんのこと、官能的な感覚である、舌ざわり、歯ごたえ、歯切れ、なめらかさ、のどごし、口どけなどの特性を含めたものと言うことができる。表 2-1にSzczenniakによってまとめられたテクスチャプロフィールを示す。

表 2-1 Szczenniak のテクスチャープロフィール

特性	1 次特性	2 次特性	一般用語	特性の内容(定義)
機 械 的 特 性	硬さ		軟らかい—歯ごたえのある— 硬い	一定の変形をさせるのに必要な力、食品を形づくっている内部結合力
	凝集性	もろさ	ポロポロの—ガリガリの—もろい	食品を破砕するときの力、硬さと凝集性に関係
		咀嚼性	やわらかい—強靱な	固形食品を飲み込める状態にまでそしゃくするのに要するエネルギー、硬さ、凝集性、弾力性に関係
		ガム性	くずれやすい—粉状—糊状—ゴム状	半固形状食品を飲み込める状態にまで砕くのに必要なエネルギー、硬さ、凝集性に関係
	粘性		サラサラした—粘っこい	単位力で流動する度合い
	弾力性		塑性のある—弾力のある	外力による変形が、力を取り去ったときにもどる割合
	付着性		ネバネバする—粘着性—ベタベタする	食品の表面と他の物(舌、歯、口蓋など)の間の引力に打ち勝つのに要する力
幾何学的特性	粒子の大きさと形 粒子の形と方向性		砂状、粒状、粗粒状、繊維状、細胞状、結晶状	
その他の特性	水分含量		乾いた—湿った—水気のある—水気の多い	
	脂肪含量	油状	油っこい	
		グリース状	脂っこい	

食品物性用語辞典(種谷真一, 林 弘通, 川端晶子 著, 養賢堂, 1996)より抜粋。

表 2-2 テクスチャー測定法

破壊様式	実用機器	測定項目	食品の分類	食品例
(1) 	圧縮破壊による機器 万能試験機 テクスチュロメータ コンプレシメータ	圧縮力, 弾性率, 粘性率, 降伏値, 破壊エネルギー, もろさ, 硬さ, 凝集 性, ガム性, そしゃ く性	固体・半固体食品 多孔性食品	バター, チーズ, 焼いたハンバーガ ー, クリーム, チー ズ, 煮たポテト, ニ ンジン, キュウリ, カスタード, マシュ マロ, ゼラチン, プ ディング, パン, ス ポンジケーキ
(2) 	せん断による機器 柔軟性測定器 抜打ち試験器	せん断力, 硬さ(剛 性率), 最大ずり応 力	せんい状食品	肉片ハンバーグ
(3) 	切断による機器 カードメータ レオメータ (刃およびピアノ 線)	切断力, 切断エネ ルギー, 硬さ, 粘 糊度	高脂肪食品ゲル 状食品	プリン, とうふ, チ ーズカード, バタ ー, チーズ, マー ガリン, ハンバーグ
(4) 	貫入による機器 ベネトロメータ*1 岡田式ゼリー強度 試験機	硬さ(貫入度)降伏 値	高脂肪食品ゲル 状食品	バター, チーズ, かまぼこ
(5) 	攪拌による機器 ファリノグラフ アミログラフ	到着時間, ドウ・デ ィベロップタイム, 安定性, 耐性係 数, ヴァロリメータ 値, 粘性率, 糊化 温度	ねり製品	米飯, もち, 小麦 粉ドウナッツ
(6) 	フードレオメータ	切断力, 切断エネ ルギー, 硬さ(弾性 係数)	ゲル状食品	かまぼこ
(7) 	シェアプレス	せん断, 圧縮力	せんい状食品	野菜, 果物, 肉

食品物性用語辞典(種谷真一, 林 弘通, 川端晶子 著, 養賢堂, 1996)より抜粋.

*1: ペネトロメータのことを指す.

テクスチャの一つの特性である農産物・食品の硬さについて Szczenniak は、一定の変形をさせるのに必要な力という定義をしている。これは前述の工業用材料での定義と同一であると言える。しかし農産物・食品の硬さの測定に、工業用材料の試験法をそのまま適用するのは困難である。農産物・食品のテクスチャは品目により大きく異なるが、主成分が水であることは共通しており、それが故に、圧子を押し付けても明確な圧痕が残りにくい。そこで金属硬さ計測のように塑性変形寸法を計測するかわりに、圧子の侵入距離を用いることが多い。力学的特性を計測するために、表 2-2 に示すような様々な試験方法が開発されてきた。また農産物の弾性率計測法については、ASAE Standards S368(米国農業工学会規格 S368)に圧縮試験(compression test)として定められたものが広く知られている。ここでは一定の載荷速度で農産物を圧縮するため準静的圧縮試験と呼ばれる方法¹¹⁾が採用されている。ASAE Standards では対象を農産物の凸状全姿(convex shape)を用いた試験を前提にしているため、Hertz 理論や Boussinesq 理論(プランジャによる貫入試験の場合)をベースに弾性率の定義がなされている。Arnold ら¹²⁾は ASAE Standards に加えて、円柱あるいは平板状に整形した試料での圧縮試験についても言及している。整形試料での圧縮試験であれば工業用材料での方法をそのまま適用することができる。

変形には弾性変形と塑性変形があり、硬さ試験では両変形に対する抵抗を測定することになる⁴⁾。金属では主に塑性変形に対する抵抗、高分子材料では主に弾性変形に対する抵抗に注目することになる。農産物・食品の場合、弾性変形に注目する場合もあれば破断・断裂にまでいたる塑性変形に注目する場合もある。前者は弾性率計測、後者は Magness-Taylor 硬度計による貫入試験に相当する。両者には相関がみられる¹³⁾ため、実用上どちらの試験法を用いても硬さに関する情報を得ることができる。

農産物のテクスチャの音響共振法による計測の先駆である Finney¹⁴⁾は、硬さ(firmness)が動的弾性率と相関があることを利用して硬さの評価を行った。その後、Abbot ら¹⁵⁾、Cooke ら¹⁶⁾もこれに続き、現在、農産物の硬さの近似値としてその弾性率を採用することがよく行われている¹³⁾。以上のことから農産物の硬さを表現する一つ的手段として、弾性率を計測することには一定の合理性と実績があると考えてよい。

さて、前述の種々の弾性率測定法は全て破壊法であるため、例えば硬さによる果実の選別を考えた場合、全品検査ができないという欠点がある。選別等への利用を考慮すると、硬さ測定は非破壊・非侵襲的に行う方がよい。このため前述の振動・音響法や近赤外分光法の利用¹⁷⁾等、多くの非破壊計測法が提案されてきた。中でも振動・音響法は、「力」に対する応答を計測するという意味で弾性率の定義に近い測定法であり、この点で他の方法よりも有利であると言える。

2.1.2. 弾性率と音速

超音波音速の計測によって等方固体や結晶体の弾性定数が測定されている¹⁸⁾。特にチタン酸バリウム磁器や水晶のような振動子として用いられる圧電性結晶体の音速はその弾

性定数(これと幾何的形狀により共振周波数が定まる)決定に非常に重要な役割を果たす。これは音速と弾性定数の間に成立する関係を利用したものであるが、農産物についても、音速を測定することで、それを弾性率、つまり硬さの指標とすることが可能であると考えられる。

本章では、振動が伝播している媒体を無限媒体と有限媒体の二つの場合に分け、既往の理論を元に媒体の弾性率と音速の関係について整理した上で、農産物の音響計測からどのような情報が得られるかについて考察を行う。

第2節 無限媒体の弾性率と振動伝播速度

2.2.1. 無限媒体について

無限媒体とは、字義どおり空間的に無限の広がりを持つ仮想上の媒質のことを表す。これは弾性波伝播現象に限らず、流体力学、伝熱工学、電磁気学など物理学の分野においてしばしば用いられる概念であり、その導入により、問題を単純化するという効果をもつ。しかし、実際の系は無限ではないため、無限媒体仮定により導き出された理論を実際の系へ適用する場合には、その系を無限媒体で近似するための前提条件を整備する必要がある。振動伝播現象を扱う場合、無限媒体で近似できるか否かについては、振動波の波長と媒体の大きさの関係を考慮すればよい。一般には、波長 $\lambda \ll$ 代表長さ L のとき、その媒質は無限媒体で近似できる。果菜・根菜類を対象とした場合、そのサイズと果肉の音速は、種別あるいは個体別に固有の大きさをもっているため、振動の周波数が高いほど波長が小さくなり無限媒体に近づいていくと言える。

2.2.2. 平面弾性波伝播理論

ここでは、空間的に無限に広がる均一弾性連続体中の平面波伝播現象について整理しておく。一般に連続体中の波動の記述にはスカラー量である音圧を用いるのは適当ではなく、2 階のテンソル量である応力と歪みが用いられる。一般化された Hooke の法則より、応力テンソルと歪みテンソルの間の線形関係を示す 4 階のテンソル量として弾性率が定義される¹⁹⁾²⁰⁾。

今、体積要素を図 2-1 のように考える。ここで σ_{ij} は x_i 軸に垂直な平面に働く x_j 方向の応力を表すテンソルである(但し、 $i, j = 1, 2, 3$)。歪みテンソル e_{kl} は変位 u とすると

$$e_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) \quad (2-1)$$

で表される(但し、 $k, l = 1, 2, 3$)。

応力と歪みの間に比例関係が成り立つため次式が成立する。

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} e_{kl} \quad (2-2)$$

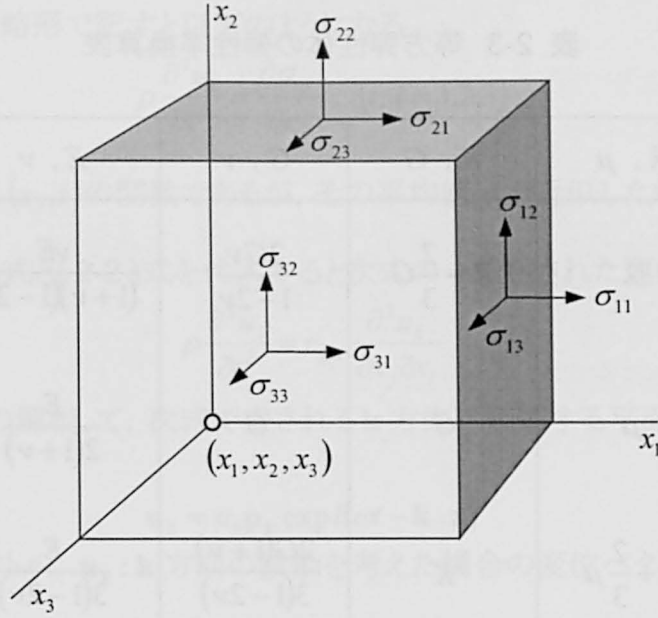


図 2-1 無限媒体中の応力テンソル

但し, c_{ijkl} : 4 階の弾性率テンソル, $i, j, k, l = 1, 2, 3$.

(2-1) 式より $e_{kl} = e_{lk}$ が成立し, また体積要素にはトルクが働かないとすると $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ が成立する. 従って Voigt の記号, $11 \rightarrow 1, 22 \rightarrow 2, 33 \rightarrow 3, 23 \text{ or } 32 \rightarrow 4, 31 \text{ or } 13 \rightarrow 5, 12 \text{ or } 21 \rightarrow 6$ を用いて (2-2) 式の表記を簡単化すると次式のようになる²⁰⁾²¹⁾.

$$\sigma_m = c_{mn} e_n \quad (m, n = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (2-3)$$

これを等方体(あるいは立方晶系)に適用した場合の c_{mn} は次のようになる²¹⁾.

$$\begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{12} & c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

また等方体の場合は特に,

$$2c_{44} = c_{11} - c_{12} \quad (2-5)$$

なる関係があるため, 独立な弾性率は二個ということになる¹⁹⁾.

古典弾性力学の各弾性率, すなわち体積弾性率 K , ヤング率 E , 剛性率 G , Lamé 定数 λ, μ と (2-4) 式の弾性率との関係をまとめると表 2-3 のようになる.

表 2-3 等方弾性体の弾性率換算表

	λ, μ	K, G	G, ν	E, ν	E, G
Lamé 定数 λ	λ	$K - \frac{2}{3}G$	$\frac{2G\nu}{1-2\nu}$	$\frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$	$\frac{G(E-2G)}{3G-E}$
Lamé 定数 μ (=剛性率 G)	μ	G	G	$\frac{E}{2(1+\nu)}$	G
体積弾性率 K	$\lambda + \frac{2}{3}\mu$	K	$\frac{2G(1+\nu)}{3(1-2\nu)}$	$\frac{E}{3(1-2\nu)}$	$\frac{EG}{3(3G-E)}$
ヤング率 E	$\frac{(3\lambda+2\mu)\mu}{\lambda+\mu}$	$\frac{9KG}{3K+G}$	$2(1+\nu)G$	E	E
ポアソン比 ν^{*1}	$\frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)}$	$\frac{3K-2G}{2(3K+G)}$	ν	ν	$\frac{E}{2G}-1$

超音波技術便覧(日刊工業新聞社, pp.1324, 1991)より引用.

*1: 原著の σ を ν に置き換えた.

体積要素に体積力 (body force) が作用していないとする. x_1 方向の力のつりあい式 (運動方程式) は次のようになる.

$$\begin{aligned}
 & -(\sigma_{11}dx_2dx_3 + \sigma_{21}dx_3dx_1 + \sigma_{31}dx_1dx_2) \\
 & + \left\{ \left(\sigma_{11} + \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1}dx_1 \right) dx_2dx_3 + \left(\sigma_{21} + \frac{\partial \sigma_{21}}{\partial x_2}dx_2 \right) dx_3dx_1 + \left(\sigma_{31} + \frac{\partial \sigma_{31}}{\partial x_3}dx_3 \right) dx_1dx_2 \right\} \\
 & = \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} dx_1dx_2dx_3 \\
 & \Leftrightarrow \\
 & \frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{21}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{31}}{\partial x_3} = \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} \quad (2-6)
 \end{aligned}$$

但し, ρ : 連続体の密度.

これは x_2, x_3 方向でも同様の式が成立するため, 変位 u_i に対する運動方程式の一般式は次のようになる.

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} \quad (2-7)$$

これを Einstein の省略形で記すと以下のようになる.

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (2-8)$$

但し, 本来密度 ρ は (x_j, t) の関数であるが, その平均値 ρ で近似したものである.

(2-8) 式に (2-1) 式と (2-2) 式を代入すると次式の一般化された運動方程式を得る.

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = c_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_l} \quad (2-9)$$

この方程式の一つの解として, 次式で表される \mathbf{k} 方向に伝播する平面波を考えると次のようになる.

$$\mathbf{u}_k = u_0 \mathbf{p}_k \exp i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{x}) \quad (2-10)$$

ここで, \mathbf{k} : 波数ベクトル, \mathbf{u}_k : \mathbf{k} 方向の波動を考えた場合の変位ベクトル, \mathbf{p}_k : \mathbf{u}_k 方向に沿った単位ベクトル.

(2-10) 式を (2-9) 式に代入すると次式の関係を得る²⁰⁾.

$$\begin{bmatrix} A - \rho c_1^2 & F & E \\ F & B - \rho c_2^2 & D \\ E & D & C - \rho c_3^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} = 0 \quad (2-11)$$

ここでテンソル成分 36 個のうち, 変形が断熱的あるいは等温的に行われるものとする熱力学的な考察より独立成分は 21 個になるため, (2-11) 式中の係数 $A \sim F$ は次のようになる²²⁾.

$$\begin{aligned} A &= c_{11}k_1^2 + c_{66}k_2^2 + c_{55}k_3^2 + 2c_{56}k_2k_3 + 2c_{15}k_3k_1 + 2c_{16}k_1k_2 \\ B &= c_{66}k_1^2 + c_{22}k_2^2 + c_{44}k_3^2 + 2c_{24}k_2k_3 + 2c_{46}k_3k_1 + 2c_{26}k_1k_2 \\ C &= c_{55}k_1^2 + c_{44}k_2^2 + c_{33}k_3^2 + 2c_{34}k_2k_3 + 2c_{35}k_3k_1 + 2c_{45}k_1k_2 \\ D &= c_{56}k_1^2 + c_{24}k_2^2 + c_{34}k_3^2 + (c_{23} + c_{44})k_2k_3 + (c_{45} + c_{36})k_3k_1 + (c_{25} + c_{46})k_1k_2 \\ E &= c_{15}k_1^2 + c_{46}k_2^2 + c_{35}k_3^2 + (c_{36} + c_{45})k_2k_3 + (c_{13} + c_{55})k_3k_1 + (c_{56} + c_{14})k_1k_2 \\ F &= c_{16}k_1^2 + c_{26}k_2^2 + c_{45}k_3^2 + (c_{25} + c_{46})k_2k_3 + (c_{14} + c_{56})k_3k_1 + (c_{12} + c_{66})k_1k_2 \end{aligned} \quad (2-12)$$

c_1, c_2, c_3 : 音速, (p_1, p_2, p_3) : \mathbf{p} の方向余弦, (k_1, k_2, k_3) : \mathbf{k} の方向余弦.

(2-11) 式は, ある一つ方向について, 三種類の独立した波が伝播できることを示す. 因みに, 音速 c の添字 1, 2, 3 は空間座標軸とは無関係である. この三種類の波の中で, 最も速いものは縦波, 残り二つの波は横波と呼ばれる. 例えば立方晶系の [100], [110], [111] 方向を考えた場合, 縦波では次式が成り立つ²⁰⁾.

$$\text{rot } \mathbf{u} = \mathbf{u} \times \mathbf{k} = 0 \quad (2-13)$$

これは $\mathbf{u} \parallel \mathbf{k}$, つまり振動の変位方向と進行方向が平行である.

同様に, 横波では次式が成立する²⁰⁾.

$$\text{div } \mathbf{u} = \mathbf{u} \cdot \mathbf{k} = 0 \quad (2-14)$$

これは $\mathbf{u} \perp \mathbf{k}$, つまり振動の変位方向と進行方向が直交している.

(2-11)式が成立する条件式は

$$\begin{vmatrix} A - \rho c_1 & F & E \\ F & B - \rho c_2 & D \\ E & D & C - \rho c_3 \end{vmatrix} = 0 \quad (2-15)$$

であり, この行列式は速度方程式と呼ばれる²⁰⁾.

等方弾性体中を[100]方向に進む波動を考えると, 波数ベクトル \mathbf{k} の方向余弦は次のようになる.

$$(k_1, k_2, k_3) = (1, 0, 0) \quad (2-16)$$

等方弾性体であるため, 弾性率テンソルは(2-4)式のようになり, 同時に(2-5)式が成立する. (2-15)式に(2-4)式, (2-5)式, (2-16)式を代入すると

$$(c_{11} - \rho c_1^2)(c_{44} - \rho c_2^2)(c_{44} - \rho c_3^2) = 0 \quad (2-17)$$

となり, 二種類の音速が求められる.

$$\begin{aligned} c_1 &= \sqrt{\frac{c_{11}}{\rho}} \\ c_2 &= c_3 = \sqrt{\frac{c_{44}}{\rho}} \end{aligned} \quad (2-18)$$

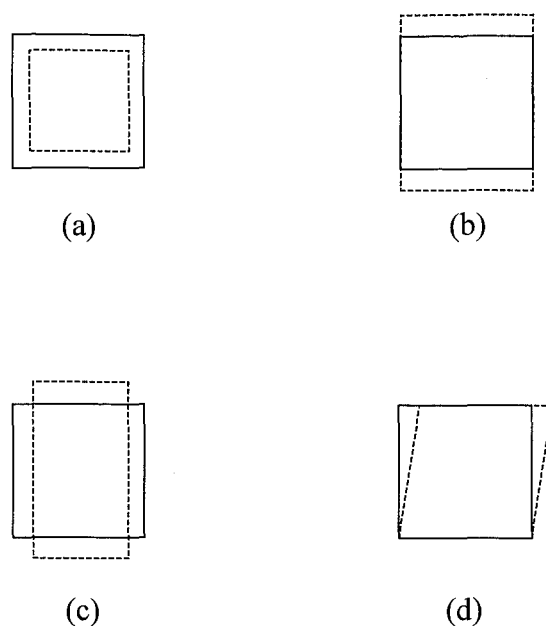
この場合, c_1 が縦波の音速, c_2, c_3 が横波の音速となる. 等方弾性体の縦波音速 c_l , 横波音速 c_s を, 表 2-3 の関係から古典弾性力学の弾性率を用いて整理した一例を次に示す.

$$\begin{aligned} c_l &= \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(K + \frac{4}{3} G \right)} \\ c_s &= \sqrt{\frac{G}{\rho}} \end{aligned} \quad (2-19)$$

一般に音速と弾性率の関係は(2-18)式のように,

$$\text{音速} = \sqrt{\frac{\text{波動による変形に関する弾性率}}{\text{密度}}}$$

の形で表される¹⁹⁾. 等方弾性体の単純変形のパターンとそれに関する弾性率を図 2-2 に示す. (2-18)式, (2-19)式より, 縦波は図中(b)の変形, つまり, 波の伝播方向(変形の方法)以外の歪みがすべて零であるような変形を, また横波は図中(d)のようなずり変形をそれぞれ媒質中にもたらすと言える.



超音波技術(東京大学出版会, pp.167, 1989)より引用.

図 2-2 等方弾性体の単純変形パターン

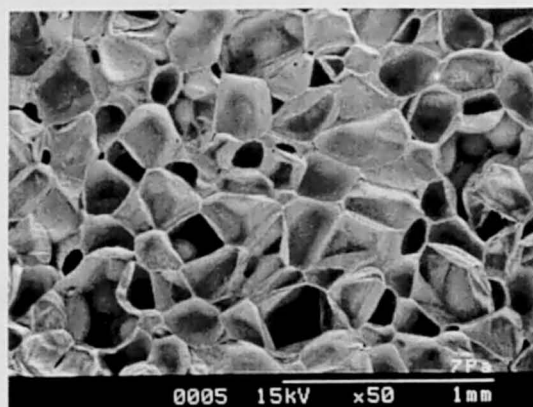
2.2.3. 果菜・根菜類柔組織の扱い

2.2.3.1. 不均一性と等方性

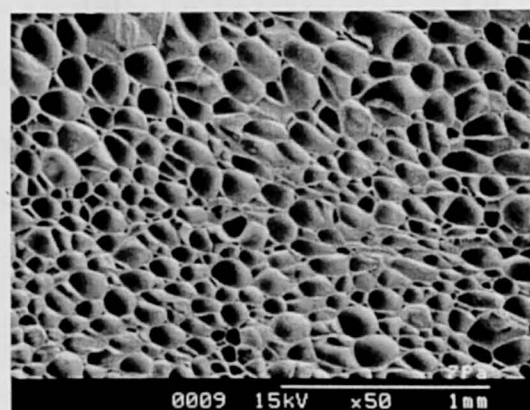
前節では, 無限媒体近似同様, 問題の単純化のために, 媒質を均一 (homogeneous, 均質とも言う)かつ等方的 (isotropic) であるとした. ここでは果菜・根菜類の可食部である柔組織の均一性と等方性について無限媒体中の振動伝播という観点から整理しておく.

果菜・根菜類柔組織の一例として図 2-3 にリンゴとダイコンの可食部組織の走査型電子顕微鏡写真を示す. このように果菜・根菜類は多数の細胞から構成されている上, 細胞形状及びそのサイズには分布があるため, 不均一であると言える.

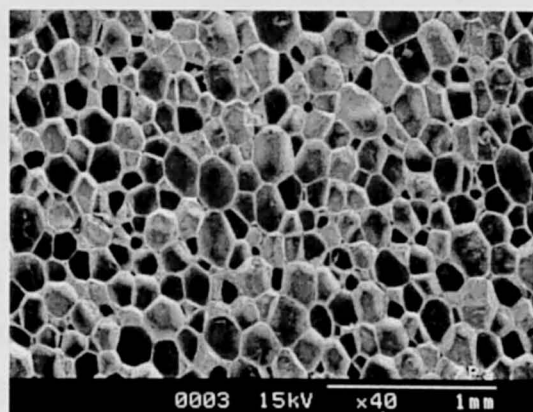
一方, 等方性は均一性とは全く別問題となる²²⁾. Saltykov²³⁾によれば, 面 (細胞組織で言えば細胞壁面に当たるものを面という) よりなる系は, 等方的 (isometric), 線配向 (linear orientation), 面配向 (planar orientation), 面線配向 (planar-linear orientation) に分類できるという. 系の全ての面について法線を取った場合, 方位球にわたって一様に分布し, 配向軸を持たないものを等方的といい, 配向軸を持つ系の中で, 大部分の面が配向軸に平行なものを線配向, 垂直なものを面配向という. 図 2-4 にトマト果肉のある一部分の顕微鏡写真を示すが, この定義に従えば, 細長い細胞が観察されるため, この部位は少なくとも等方的であるとは言いがたい.



リンゴ果肉(表皮と芯の中間より採取)



リンゴ果肉(芯部近傍より採取)



ダイコン柔組織

図 2-3 リンゴ・ダイコン柔組織の SEM 写真

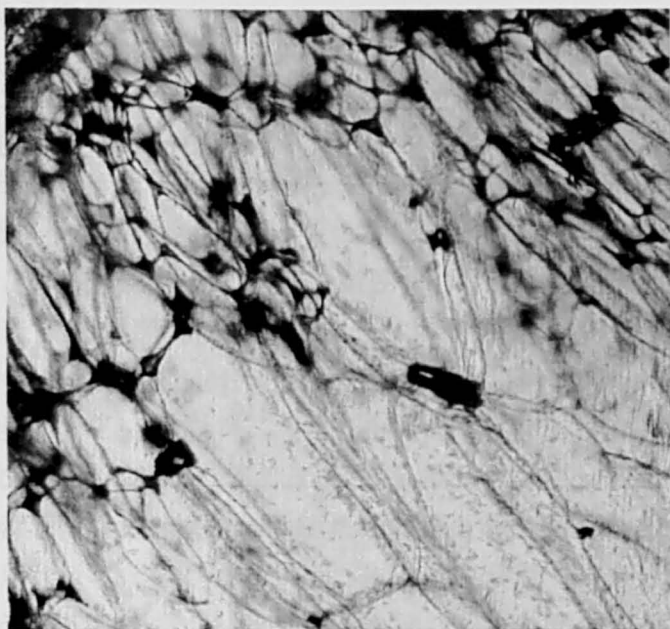


図 2-4 トマト果肉細胞の一例

以上の均一性・等方性についての考察は、細胞という空間上の構造に注目したものである。振動伝播問題においては、構造よりも振動に関わる力学的物性値(例えば弾性率)の空間分布に注目する必要がある。前節で述べた通り、振動様式によって支配的な弾性率は異なってくる。例えば、体積弾性率支配の(他の弾性率の寄与が無視できるほど小さい)振動様式(前節に言う縦波)を考えた場合、圧力に対する空間的な体積変動への関わりは、系内で空間的に占める割合が多い成分ほど大きい。柔組織の場合は成分のほとんどを細胞内液、すなわち水が占めていて、言わば柔組織はこの水を十分に柔軟な細胞壁で細かく仕切って保水した媒質という見方ができる。Mohsenin²⁴⁾がまとめた各種果菜・根菜類果肉のみかけの弾性率は約 3.4~10.5MPa であったのに対して、水の体積弾性率は 2220MPa と、ヤング率・剛性率よりも 200 倍以上も大きい。縦波は体積弾性率が支配的であると言える。このような体積弾性率支配の振動では、圧力変動に対する組織の体積変動を担うのは細胞内液であり、この意味で均一性及び等方性を仮定してもよいと考えられる。

しかし、後述するように果菜・根菜類柔組織の細胞間隙には体積分率にして数%~50% 近くまでガスが存在している。ガスは圧縮性であることから体積弾性率は無限大になる。従って、体積弾性率支配の振動では、ガスの存在は大きな影響をもつと考えられる。組織内ガスは柔組織中に分散しているため、厳密には均一性は失われる。一般に実在の物質は原子レベルまでスケールを下げれば、厳密な意味ですべて不均一系となる²⁵⁾。均一媒体というのは理想上の物質であり実在しない。不均一系(heterogeneous medium)とは内部の物性値が空間位置によって変動する系のことを言う。この空間的変動が不規則な場合、ランダム系(random medium)として取り扱われる²⁵⁾。堀²⁵⁾によると、ランダムな不均一系理論では、

表 2-4 果菜・根菜類柔組織中の超音波波長

	縦波音速 [m/s]	中心周波数[kHz]	波長 [mm]
ダイコン	351.6	110	3.20
サツマイモ	213.9	110	1.94
リンゴ	131.6	110	1.20
カブ	116.5	110	1.06
カブ	137.5	110	1.25
カブ	153.2	110	1.39

出典:平井宏昭, 穂波信雄, 第 49 回農業機械学会年次大会講演要旨, pp.179-180, 1990.

統計的な均一性 (statistical homogeneity) が仮定されることが多いという。試料内部の物性値変動の波長が系の特性長さ (characteristic length) に比較して十分小さく, どの部分も統計的に同じ変動を示す場合, 統計的均一 (statistical homogeneity), 巨視的均一 (macroscopic homogeneity), 一様に不均一 (uniform homogeneity) という表現がなされる。柔組織中の振動伝播現象を考える場合, 系の特性長さは振動波長と考えるのが合理的である。組織内ガスは細胞間隙中に存在するため, 仮に物性値の空間変動の波長を細胞の大きさとする, 波長が細胞よりも十分に大きく, かつ細胞間隙の空間分布に偏りが無い場合, 統計的な均一性を仮定できる。波長の短い超音波 (110kHz) を用いて果菜・根菜類組織を計測した平井²⁶⁾の計測データから波長を計算した結果を表 2-4 に示す。波長は 1~3mm 程度で, 通常果肉の細胞サイズが数百 μm 以下であることから, 特性長さよりも構成サイズが小さいという条件は満たしていると考えられる。従って, 本研究では組織内ガスの分布に大きな偏りが無い限り, 統計的均一性を仮定することができるものとした。

一方, ヤング率, 剛性率などが支配的な振動様式, いわゆる横波は, 果肉の主成分である水の横波吸収が非常に大きく, 1 波長以内で減衰してしまう²⁷⁾ために, バルク波としての横波が果肉中を伝播することはないと考えられる。

以上より, 本論文では以降, 百数十 kHz 以下の振動伝播問題を考える場合には, 果菜・根菜類柔組織は統計的均一性及び等方性を有するものと仮定することとした。

2.2.3.2. 応力-歪み関係の線形近似

物体中を音響波動が伝播する場合, 振動にともなう歪みは微小であるために応力と歪みの関係に線形性があると仮定することが多い²⁸⁾。そこで本研究においても, 対象とする果菜・根菜類柔組織中の音響波動伝播現象を考える場合, 線形性が成立するものとした。

2.2.3.3. 弾性体と粘弾性体

農産物の応力－歪み関係は、Hooke 固体とは異なり、時間あるいは応力依存性があるため、一般に粘弾性体と考えられる²⁹⁾³⁰⁾。従って厳密な意味においては、前述の線形性近似と併せ考えると、農産物中の音響波動伝播現象を考える際には、線形粘弾性体中の伝播としての扱いから出発するのが適当である。また実際、音響波動の媒質による吸収や音響パラメータの分散性などが観測されることから、厳密には、複素弾性率、複素音速等、音響パラメータを複素量で表す必要がでてくる。このことは、音響波動の伝播が多くの物理特性値の上に成り立っていることを意味し、音速に代表される音響パラメータを計測する際に、例えば周波数を変動させる、あるいは材料のサイズを変えるなどの何らかの摂動を与えながら計測し、未知変数の数に應ずるだけの計測データ組を用意する必要があることを意味している。音波による果菜・根菜類の非破壊品質評価法の実用化を考慮した場合、多くのデータ組を必要とすることは実用化への足枷となる。仮に非破壊品質評価を行う際の指標（たとえば貫入抵抗やみかけのヤング率）と音響パラメータの計測値との間に実用上有効な相関があれば、そのパラメータを用いた硬度計測は可能であると言える。またその相関を与える物理的解釈が線形弾性理論でおおよそ近似できるのであれば、音響波動を利用した果菜・根菜類の非破壊品質評価システムの実用化を図る上で有益な資料を与え得ると考えられる。

ここでは、等方線形粘弾性体中の縦波・横波音速と粘弾性定数の関係について文献²⁰⁾³¹⁾⁻³⁴⁾を元に整理し、果菜・根菜類へ適用した場合に想定される事柄について考察する。

斎藤³¹⁾・和田³²⁾³³⁾の線形系の刺激応答の現象論から出発する。

今、対象とする系は次の性質を有すると仮定する³³⁾。

- 1) 因果性: 系に原因となる刺激が加わる以前に、結果である応答が生ずることはない。
- 2) 定常性: 系がどんな状態でも、一定の刺激に対しては一定の応答が生ずる。
- 3) 線形性: 系に刺激 X が加えられた結果、応答 Y が観測された場合、 $Y = CX$ なる関係が成り立つ。また X_1 , X_2 の刺激が加わったときの応答を Y_1 , Y_2 とすると、 $(X_1 + X_2)$ の刺激を与えた場合、その応答は $(Y_1 + Y_2)$ となる（重ね合わせの原理）。音響波動伝播現象を考える場合の刺激と応答は、応力と歪みの組み合わせとなる。刺激 X が応力で応答 Y が歪みの場合、 C はコンプライアンスとなり、 X , Y がそれぞれ歪みと応力の場合、 C は弾性率となる。

粘弾性の場合、系は時間に依存する性質を持つため、 X が時間 t の関数である場合、 Y は過去の X の値にも依存するため、 Y は X の汎関数ということになる。

ステップ状の刺激 $X = X_0 H(t)$ (但し、 X_0 は定数、 $H(t)$ は Heviside 関数) を加えた場合、その応答関数を

$$\frac{Y(t)}{X_0} = C_s(t), t > 0 \quad (2-20)$$

とする。

任意の刺激 $X(t)$ に対する応答 $Y(t)$ について考えてみる。 $X(t)$ を多くの微小刺激に分解し、

その i 番目(時間 $u_i \sim u_i + \delta u$)の微小量要素 δX_i に対する応答 δY_i は次式で表される³²⁾.

$$\delta Y_i = C_s(t - u_i) \delta X_i(u_i) \quad (2-21)$$

この式を因果性より $-\infty$ から t までの範囲で重ね合わせた結果(線形重ね合わせ)は次のようになる.

$$Y(t) = \int_{-\infty}^t C_s(t - u) dX = \int_{-\infty}^t C_s(t - u) \frac{dX}{du} du \quad (2-22)$$

今, 正弦的に変動する刺激 $X(u) = X_0 \exp(i\omega u)$ を与えることを考える. このときの応答も正弦的な変動を行うため, $Y(t) = Y_0 \exp(i\omega t)$ とし, (2-22)式に代入すると次式を得る.

$$Y_0 \exp(i\omega t) = \int_{-\infty}^t C_s(t - u) \cdot i\omega X_0 \exp(i\omega u) du \quad (2-23)$$

周波数応答関数 $C^* = Y_0/X_0$ は次のようになる.

$$\begin{aligned} C^*(i\omega) &= i\omega \int_{-\infty}^t C_s(t - u) \cdot \exp[-i\omega(t - u)] du \\ &= i\omega \int_0^\infty C_s(\xi) \cdot \exp(-i\omega\xi) d\xi \end{aligned} \quad (2-24)$$

但し $\xi = t - u$. また, C^* は $(i\omega)$ の実関数.

線形粘弾性体に $t \geq 0$ において単位歪みを加えたときの応力を緩和弾性率 $M(t)$ と呼ぶ³¹⁾⁻³⁴⁾. LaChatelier-Braun の原理により $M(t)$ は t とともに増加することはないため, $M(t)$ は一般に次式のように表される³¹⁾⁻³³⁾.

$$M(t) = (M_g - M_e) \bar{\varphi}(t) + M_e \quad (2-25)$$

ここで $\bar{\varphi}(t)$ は緩和関数で, $t = 0$ で1, $t \rightarrow \infty$ で0に漸近する. また M_g , M_e はそれぞれ $t = 0$, $t \rightarrow \infty$ での $M(t)$ の値のことで, それぞれ瞬間弾性率(ガラス弾性率), 平衡弾性率と呼ぶ.

緩和関数 $\bar{\varphi}(t)$ は緩和時間が単一の場合, $\bar{\varphi}(t) = \exp(-t/\tau)$ と書くことができ, (2-25)式は次のように書ける.

$$M(t) = (M_g - M_e) \exp(-t/\tau) + M_e \quad (2-26)$$

ここで, τ : 緩和時間.

次にこの線形粘弾性体に正弦的な歪みを加えた場合について考えると, (2-24)式の $C_s(t)$ に $M(t)$ を代入したものが成立する. このときの左辺 C^* に相当するものを複素弾性率と呼び, M^* で表すものとする. 以上のことから(2-24)式は次のように表される.

$$\begin{aligned} M^* &= i\omega \int_0^\infty \{ (M_g - M_e) \exp(-\xi/\tau) + M_e \} \cdot \exp(-i\omega\xi) d\xi \\ &= (M_g - M_e) \frac{i\omega\tau}{1 + i\omega\tau} + M_e \\ &= \left[(M_g - M_e) \frac{\omega^2\tau^2}{1 + \omega^2\tau^2} + M_e \right] + i \left[(M_g - M_e) \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \right] \end{aligned} \quad (2-27)$$

複素弾性率 M^* の実部, 虚部をそれぞれ $M'(\omega)$, $M''(\omega)$ とおくと次式の関係が成り立つ.

$$M^*(i\omega) = M'(\omega) + iM''(\omega)$$

$$\begin{cases} M'(\omega) = (M_g - M_e) \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} + M_e \\ M''(\omega) = (M_g - M_e) \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \end{cases} \quad (2-28)$$

$M'(\omega)$ は貯蔵弾性率 (動的弾性率), $M''(\omega)$ は損失弾性率に相当する. またそれらの比 M''/M' は損失正接に相当し, 振動エネルギーが熱として散逸する割合を表す.

緩和時間に分布がある場合には (2-26) 式は次のように書き表すことができる.

$$M(t) = \sum_{i=1}^N G_i [\exp(-t/\tau)]_i + G_e \quad (2-29)$$

同様に (2-24) 式に代入して整理すると複素弾性率 M^* は次式のようにになる.

$$M^*(i\omega) = M'(\omega) + iM''(\omega)$$

$$\begin{cases} M'(\omega) = \sum_{i=1}^N G_i \frac{\omega^2 \tau_i^2}{1 + \omega^2 \tau_i^2} + G_e \\ M''(\omega) = \sum_{i=1}^N G_i \frac{\omega \tau_i}{1 + \omega^2 \tau_i^2} \end{cases} \quad (2-30)$$

以上は線形粘弾性体の歪み-応力の関係の一般的な表現である. 実際は, ずり変形, 体積変形, 側面を拘束した場合の変形など様々な変形様態を取る. 表 2-5 に等方性媒質について変形様式別にその複素弾性率をまとめたもの³⁴⁾を示す. 等方弾性体と同じく, 独立な複素弾性率, つまり独立な変形は二つとなる.

表 2-5 複素弾性率

変形様式	複素弾性率	貯蔵弾性率	損失弾性率	動的粘性率	相互関係	波動様式
ずり	G^*	G'	G''	η'	—	広い媒質中の横波 棒中の捩れ波
体積変化	K^*	K'	K''	κ'	—	液体音場内におかれた小さな固体
伸び (側面自由)	E^*	E'	E''	—	$E^* = \frac{9G^*K^*}{3K^* + G^*}$	棒中の縦波 彎曲波
伸び (側面固定)	L^*	L'	L''	—	$L^* = K^* + \frac{4}{3}G^*$	広い媒質中の縦波
ポアソン比	ν^*	ν'	ν''	—	$\nu^* = \frac{3K^* - 2G^*}{2(3K^* + G^*)}$	—

超音波技術便覧 (日刊工業新聞社, pp.965, 1991) より引用.

*1: 原著の σ を ν に置き換えた.

次にこれらの弾性率と音速の関係について整理する。複素弾性率の実部と虚部の比である損失正接は、粘弾性体を考える場合零ではないため、振動エネルギーが媒質中を伝播する過程で、そのエネルギーの一部が熱として散逸すると考えられる。これは音響エネルギーの吸収であり、実際には振動伝播中の振動振幅の減少として観測することができる。そこで今対象とする系は等方線形粘弾性体とし、波動伝播方向についてのみ考えてみると、 x 方向に進む平面波は次式で表すことができる²⁰⁾。

$$\begin{aligned} u(x, t) &= u_0 \exp(-\alpha x) \cdot \exp(i(\omega t - kx)) \\ &= u_0 \exp(-\alpha x) \cdot \exp\left[i\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)\right] \end{aligned} \quad (2-31)$$

但し、 α : 吸収係数, k : 波数, c : 音速。

複素音速 c^* を

$$u(x, t) = u_0 \exp\left[i\omega\left(t - \frac{x}{c^*}\right)\right] \quad (2-32)$$

で定義すると、(2-31)式と(2-32)式から複素音速 c^* は次のように書き表される²⁰⁾。

$$\frac{1}{c^*} = \frac{1}{c} + \frac{\alpha}{i\omega} \quad (2-33)$$

(2-18)式に示すように、一般に音速 c と弾性率 M は $c = \sqrt{M/\rho}$ の関係で結ばれている。この関係は複素音速と複素弾性率においても成立するため次のように表すことができる。

$$c^* = \sqrt{\frac{M^*}{\rho}} \quad (2-34)$$

無限媒体中の縦波モードを考えた場合、表 2-5 中の複素弾性率 L^* を(2-34)式に代入して、整理すると次のようになる。

$$\begin{aligned} L^* &= L' + iL'' \\ L' &= K' + \frac{4}{3}G' = \rho c_l^2 \frac{1 - \left(\frac{\alpha_l c_l}{\omega}\right)^2}{\left\{1 + \left(\frac{\alpha_l c_l}{\omega}\right)^2\right\}^2} \\ L'' &= K'' + \frac{4}{3}G'' = \rho c_l^2 \frac{2\left(\frac{\alpha_l c_l}{\omega}\right)}{\left\{1 + \left(\frac{\alpha_l c_l}{\omega}\right)^2\right\}^2} \end{aligned} \quad (2-35)$$

但し、 c_l : 縦波音速, α_l : 縦波吸収係数。

ここで、 $\alpha_l c_l / \omega \ll 1$ (あるいは $k_l \ll \alpha_l$) の場合、(2-35)式は

$$L' = \rho c_l^2$$

$$L'' = \frac{2\alpha_l \rho c_l^3}{\omega} \quad (2-36)$$

となる³⁴⁾. この式より縦波音速 c_l は,

$$c_l = \sqrt{\frac{L'}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(K' + \frac{4}{3} G' \right)} \quad (2-37)$$

となる³⁴⁾.

等方弾性体と同じく等方粘弾性体においても横波モードが理論上存在する. その場合の横波弾性率であるずりの複素弾性率 G^* について, 縦波モードの場合と同様に整理すると次式を得る.

$$G^* = G' + iG''$$

$$G' = \rho c_s^2 \frac{1 - \left(\frac{\alpha_s c_s}{\omega} \right)^2}{\left\{ 1 + \left(\frac{\alpha_s c_s}{\omega} \right)^2 \right\}^2} \quad (2-38)$$

$$G'' = \rho c_s^2 \frac{2 \left(\frac{\alpha_s c_s}{\omega} \right)}{\left\{ 1 + \left(\frac{\alpha_s c_s}{\omega} \right)^2 \right\}^2}$$

但し, c_s :横波音速, α_s :横波吸収係数.

ここで, $\alpha_s c_s / \omega \ll 1$ (あるいは $k_s \ll \alpha_s$) の場合, (2-38)式は

$$G' = \rho c_s^2$$

$$G'' = \frac{2\alpha_s \rho c_s^3}{\omega} \quad (2-39)$$

となる³⁴⁾. この式より縦波音速 c_s は,

$$c_l = \sqrt{\frac{G'}{\rho}} \quad (2-40)$$

となる³⁴⁾.

以上より, 粘弾性体中の音速は,

$$\frac{\alpha c}{\omega} \ll 1 \quad \text{or} \quad k \ll \alpha \quad (2-41)$$

が成立するとき, 弾性体中の音速式, 即ち(2-19)式と同じ形となる. (2-19)式中の弾性率は完全弾性体のものであって, ここでは弾性率は貯蔵弾性率(動的弾性率)であることに注意が必要である. 因みに複素弾性率の虚部 L'' , G'' が零, 即ち $(\alpha \rho c^3) / \omega = 0 \Rightarrow \alpha = 0$ のとき, 実部は完全弾性体の弾性率と等しいため, (2-37)式及び(2-40)式は(2-19)式と等価とな

る。(2-35)式及び(2-38)式は粘弾性体中の音速に周波数依存性があることを示しているが、(2-41)式を満たす場合、一般的に言えば吸収が小さい場合は周波数依存性がなくなるということになる。

農産物果肉についてこの関係について検討してみる。農産物に関する音波物性の計測報告では縦波音速の報告は多いが、吸収係数に関する報告は少ない。その中で、両方のパラメータを同一試料で計測した平井²⁶⁾の報告データを元に検討を行う。

まず、複素音速の理論はあくまで現象論によるものであり、その出発式である(2-31)式についての検証が必要である。平井によるダイコン試料厚と伝播信号振幅の減衰についての計測例を図 2-5 に示す。このグラフより信号振幅が指数関数的に減少しており、(2-31)式中の減衰項 $\exp(-\alpha x)$ がよい近似を与えていることがわかる。またサツマイモ、リンゴ、カブにおいても同様に指数関数的な振幅減少が見られるという。このことから(2-31)式の適用について特に問題はないものと考えられる。次に、同じく平井によって計測されたダイコン、サツマイモ、リンゴ、カブの縦波音速、吸収係数、波動の中心周波数を用いて(2-41)式の条件についてまとめた結果を表 2-6 に示す。 $\alpha c/\omega$ 項は 0.04~0.24 の値を取り、1 よりも小さく零に近い値となった。また計測データをもとに(2-35)式より算出した弾性率を用いて(2-37)式から計算した音速と実際の音速との比を計算すると、その比は 0.97~0.998 となり、(2-37)式で近似してもそれほど大きな影響はないと言える。果菜・根菜類組織の成分のほとんどは水からなる。水は 10GHz くらいまではその縦波音速が一定で、またその値はよく測定装置の検定に用いられるほど安定していることが知られている²⁷⁾が、このことは(2-37)式の近似が成立する一因と考えられる。平井のデータから約百数十 kHz 以下であ

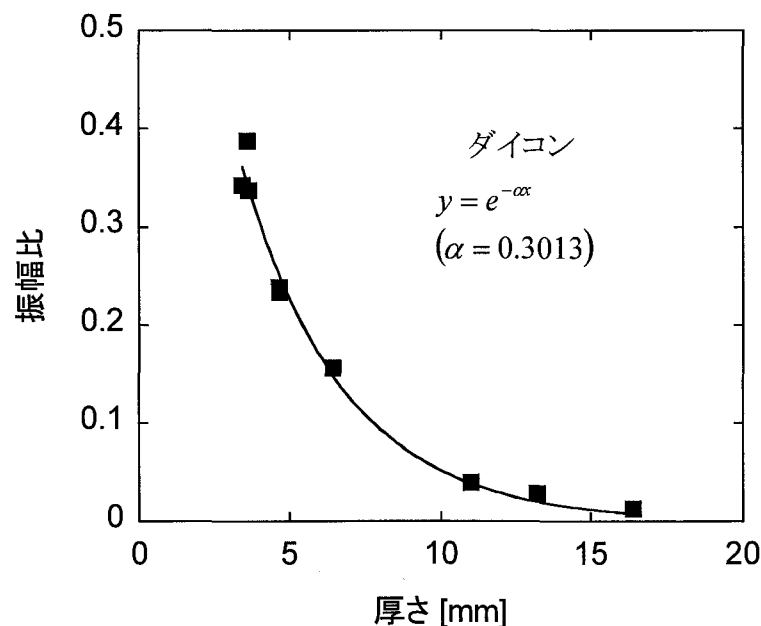


図 2-5 ダイコン試料厚と伝播超音波信号の減衰

表 2-6 果菜・根菜類柔組織の $\alpha c/\omega$ について

	縦波音速 [m/s]	吸収係数 [neper/mm]	中心周波数 [kHz]	$\alpha c/\omega$	複素弾性率 の実部より 算出される 音速に対す る比
ダイコン	351.6	0.3013	110	0.153	0.988
サツマイモ	213.9	0.2032	110	0.063	0.998
リンゴ	131.6	0.2295	110	0.044	0.999
カブ	116.5	1.447	110	0.244	0.970
カブ	137.5	1.0702	110	0.213	0.977
カブ	153.2	0.5033	110	0.112	0.994

平井ら(第 49 回農業機械学会年次大会講演要旨, pp.179-180, 1990)の計測データをもとに計算.

れば(2-37)式, (2-40)式の近似が成立すると言える.

また, 音響エネルギーの吸収の要因である熱エネルギーによる散逸という観点から(2-37)式, (2-40)式近似について考察を加えてみる. 音波, 例えば縦波振動が媒質中を伝播する場合, 媒質の圧縮・膨張のサイクルが時空間で展開されている. 圧縮された部分では圧縮仕事にともない内部エネルギーが増加し, 膨張された部分では逆に内部エネルギーが減少し, 両者は空間的に音波波長の半分の距離をおいて交互に配置される. 当然両者の間には熱伝導(当然輻射も存在するが極めて微小)による熱エネルギーの交換がおこる. このエネルギー交換は音波エネルギーの減衰の一原因となる. 通常, 音波の伝播が断熱的であるといわれている. Newton(1642-1727)が空気中の音波の伝播過程を等温過程として, 等温体積弾性率を用いてその音速を 280m/s (0℃時)と導いたが, 実際の音速 332m/s と異なっており, 後に Laplace(1749-1827)がこれを断熱過程として, 断熱体積弾性率を用いると実測値とよく一致したという³⁵⁾. これは空気の話であるが, 果菜・根菜類柔組織中の音波の伝播が断熱過程であるかについて考えてみる. 連続体中の音波が伝播現象が断熱過程か等温過程かについては, 野村ら³⁶⁾が和田の理論による解説を行っている. 縦波音波では前述の高温部と低音部が波長 λ の半分の距離をおいて交互に配置される. 高温部と低温部の間の温度伝導の時間を t' とすると, t' は熱拡散率 D に逆比例し, また距離の二乗に反比例する. 距離 l を音波の波長程度とすれば, t' は $t' \approx l^2/D \approx \lambda^2/D$ で表される. また音波の周期 t は c を音速とすると, $t = \lambda/c$ となる. $t' \gg t$ であれば, 熱エネルギーの交換がほとんど行われないうちに高温部と低温部の位置が変化するため熱伝導はほぼ無視でき, 断熱的であると言えることができる. $t' \ll t$ であれば, 高温部と低温部の位置が変化する前に熱エネルギーの交換が行われてしまうため, 等温過程ということになる. この t' と t に関する両式より, 波長 λ が大きいほど, 周

波数が低くなるほど、断熱的な過程に近づくと言える。波長が $\lambda \approx D/c$ より十分大きい場合、あるいは周波数が $f \approx c^2/D$ より十分小さい場合に断熱過程、その逆の場合に等温過程であると言う。

そこで果菜・根菜類の成分の 90% 近くを占める水について、熱拡散率 $D = 1.422 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ (17°C 時)⁵⁷⁾、音速 $c = 1473.07 \text{m/s}$ (17°C 時)³⁷⁾ として周波数 f を計算すると $1.53 \times 10^{13} \text{Hz}$ となり、数百 kHz 以下の音波では断熱過程として扱うことになる。また果菜・根菜類柔組織の熱拡散率 $0.9 \sim 2.5 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ ³⁸⁾ 及び音速 $180 \sim 1400 \text{m/s}$ ³⁹⁾ から計算すると、周波数は $1.3 \times 10^{11} \sim 2.2 \times 10^{13} \text{Hz}$ となり、やはり数百 kHz 以下の音波の伝播は事実上断熱過程であると言える。以上のことより本研究では、果菜・根菜類柔組織の振動伝播においては (2-37) 式、(2-40) 式近似が成立するものとした。

一方、等方無限媒体のもう一つの振動モードである横波については、前述したように農産物の場合、1 波長以内で減衰してしまうため²⁷⁾、事実上バルク波としての横波が果肉中を伝播しないと考えられる。

2.2.4. 無限媒体中の振動伝播速度から得られる弾性情報

無限媒体としての農産物果肉中には縦波振動が主に伝播し、その縦波音速 c_l は縦波弾性率 $L' = K' + \frac{4}{3}G'$ と密度 ρ をもって次のように表される。

$$c_l = \sqrt{\frac{L'}{\rho}} = \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(K' + \frac{4}{3}G' \right)} \quad (2-42)$$

リンゴ、カボチャ、サツマイモ、スイカ、ダイコン、トウガン、ナシ、ニンジン、バレイショの密度を液体置換法によって計測した結果をまとめたものと、Mohsenin による報告例の抜粋を次頁の表 2-7 に示す。密度は約 $0.7 \sim 1.2 \text{g/cm}^3$ の範囲に分布している。(2-42) 式中の弾性率を固定して密度をこの範囲で振った場合、音速値の変化率はおおよそ 30% ほどになる。しかし同一品種別にみた場合には音速の変化率は、1~4% ほどになる。この密度の変化率が弾性率の変化率よりも小さい場合には、縦波音速は弾性率に支配的に左右され、弾性率が大きくなると音速も大きくなる。従って、縦波音速の計測結果から果菜・根菜類組織の弾性率情報が得られる可能性があると言える。

表 2-7 果菜・根菜類果肉の密度

品名	密度 [g/cm ³]	発表者	品名	密度 [g/cm ³]	発表者
りんご			かんきつオレンジ		
デリシヤス	0.83	Cooper (1962)	ハレンシア	0.93	Turrel&Slack (1948)
デリシヤス	0.83	Mohsenin et al. (1965)	ワシントンナバル	0.95	Turrel&Slack (1948)
ゴールデン デリシヤス	0.75	Cooper (1962)	コーヒー	1.01-1.09	Eschenwald (1959)
ゴールデン デリシヤス	0.81	Mohsenin et al. (1965)			
ゴールデン デリシヤス	0.79-0.84				
	0.81	PSU(未発表)	梨	0.98-1.00	PSU(未発表)
マッキントッシュ	0.74	Cooper (1962)			
マッキントッシュ	0.81	Mohsenin et al. (1965)			
マッキントッシュ	0.77-0.80		桃	0.99-1.01	PSU(未発表)
	0.78	PSU(未発表)			
メルバ	0.71	Cooper (1962)			
メルバ	0.79	Mohsenin et al. (1965)	エルハータ	0.99-1.01	PSU(未発表)
メルバ	0.76-0.81			0.99	
	0.80	PSU(未発表)	レットヘブン	0.98-1.03	
ローマビュティ	0.79	Cooper (1962)	プラム	0.99-1.08	PSU(未発表)
ローマビュティ	0.82	Mohsenin et al. (1965)			
ローマビュティ	0.82-0.87				
	0.84	PSU(未発表)	ばれいしょ	1.15	Gilfillan & Crowther (1959)
ステイマン	0.82	Cooper (1962)			
ステイマン	0.86	Mohsenin et al. (1965)			
ステイマン	0.82-0.89		カテイデイン	1.06-1.08	Sides et al. (1962)
	0.86	PSU(未発表)	カテイデイン	1.07	
こけもも	1.01	Sides et al. (1962)	カテイデイン	1.07	Finney (1963)
			ケネベック	1.07	Finney (1963)
			ケアーズピンク	1.12	Gilfillan & Crowther (1959)
—	0.70-1.20	PSU(未発表)	ネットトシユム	1.07-1.11	Timbers (1964)
			オンアウェイ	1.08	
			ルセットパーハンク	1.06	Finney (1963)
さくらんぼ	0.97-1.05	PSU(未発表)	シハアコ	1.07	Finney (1963)
			かんきつレモン	0.93	Turrel&Slack (1948)

PSU: ペンシルバニア州立大学.

食品の物性(N.N.モーセニン, 林 弘通 監・訳, 光琳, pp.632-633, 1982)より抜粋.

第3節 有限媒体の弾性率と振動伝播速度

2.3.1. 有限媒体について

無限媒体は無限に広い仮想上の媒体であって、現実の媒体は厳密な意味では全て有限媒体となる。しかし着目する事象によっては無限媒体近似が可能であり、前節では果菜・根菜類柔組織中の超音波伝播現象を取り扱う場合には無限媒体近似が可能であることを論じた。つまり試料片サイズより音波波長が十分小さいときには無限媒体近似が成立するが、逆に試料片サイズに比して音波波長が無視できないほど大きくなると、無限媒体近似では無理が生ずる場合がある。例えば、金属の細い棒の一端に縦振動を加えた場合、側面が自由ではあるものの金属の剛性のために側面に変形して完全に逃げることなく、ポアソン比で表される分だけしか側面が変形せず、棒内に圧力が生じ、音波として伝播する。この場合、縦波弾性率はヤング率となり⁴⁰⁾⁴¹⁾、その音速 c_b は

$$c_b = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2-43)$$

となる。

無限媒体中の縦波振動を考えた場合、媒質の変位は音波の進行方向だけに限定されるため、縦波振動の進行方向に直角の向きに伸び縮みすることが許されなく⁴¹⁾なり、縦波弾性率は体積弾性率と剛性率から表され、その場合の音速 c_l は

$$c_l = \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(K + \frac{4}{3} G \right)} \quad (2-44)$$

このように無限媒体と有限媒体では全く異なる現象を扱うことになる。表 2-8 に固体工業材料の密度、各種弾性率、無限媒体中の縦波音速 c_l 、棒に沿った縦波音速 c_b についてまとめたもの⁴²⁾を示す。

いずれも $c_l > c_b$ であり、その比 c_l/c_b は1.0から1.8程度まで分布している。等方均一媒体では弾性率間で次のような関係がある。

$$\begin{aligned} K &= \frac{E}{3(1-2\nu)} \\ G &= \frac{E}{2(1+\nu)} \end{aligned} \quad (2-45)$$

表 2-8 固体の弾性と音速度

固体	ρ [g/cm ³]	E [dyn/cm ²]	G [dyn/cm ²]	ν	c_b [m/s]	c_p [m/s]	c_l [m/s]	c_t [m/s]	ρc_l [gs/cm ²]	c_l/c_b
		$\times 10^{11}$	$\times 10^{11}$						$\times 10^5$	
アルミニウム	2.7	6.85	2.56	0.34	5040	5360	6260	3080	1.69	1.24
亜鉛	7.1	10.3	4.12	0.25	3810		4170	2410	2.96	1.09
カドミウム	8.6	4.95	1.94	0.30	2400	2520	2780	1500	2.40	1.16
銀	10.5	7.32	2.36	0.38	2640	2850	3600	1500	3.80	1.36
金	19.3	7.95	2.78	0.42	2030	2240	3240	1200	6.26	1.60
コンスタンタン	8.8	16.3	6.13	0.33	4300	4550	5240	2640	4.60	1.22
錫	7.3	5.44	2.04	0.33	2730	2890	3320	1670	2.42	1.22
真鍮	8.1	8.82	3.40	0.30	3300	3460	3830	2050	3.10	1.16
蒼鉛	9.8	3.14	1.19	0.33	1790	1900	2180	1100	2.14	1.22
タングステン	19.1	35.4	13.1	0.35	4360	4600	5460	2620	10.42	1.25
鉄	7.7	20.6	8.03	0.28	5180	5390	5850	3230	4.50	1.13
銅	8.9	12.3	4.55	0.35	3710	3960	4700	2260	4.18	1.23
鉛	11.4	1.64	0.586	0.44	1200	1340	2170	700	2.46	1.81
白金	21.4	16.8	5.97	0.39	2800	3040	3960	1670	8.46	1.41
ニッケル	8.8	20.1	7.71	0.31	4785	5030	5630	2960	4.95	1.18
マンガン	8.4	12.3	4.64	0.33	3830	4060	4660	2350	3.90	1.22
洋銀	8.4	10.8	3.92	0.37	3580	3850	4760	2160	4.00	1.33
石英ガラス	2.7	7.50	3.21	0.17	5370	5450	5570	3515	1.45	1.04
重フリントガラス	4.6	5.60	2.27	0.24	3490	3600	3760	2220	1.73	1.04
フリントガラス	3.6	5.76	2.36	0.22	4000	4100	4260	2560	1.54	1.07
クラウンガラス	2.5	7.02	2.92	0.22	5300	5430	5660	3420	1.41	1.07
エボナイト	1.2	0.296			1570		2300		0.276	1.46
氷	1	1.076	0.336	0.33	3280	3470	3980	1990	23.98	1.21

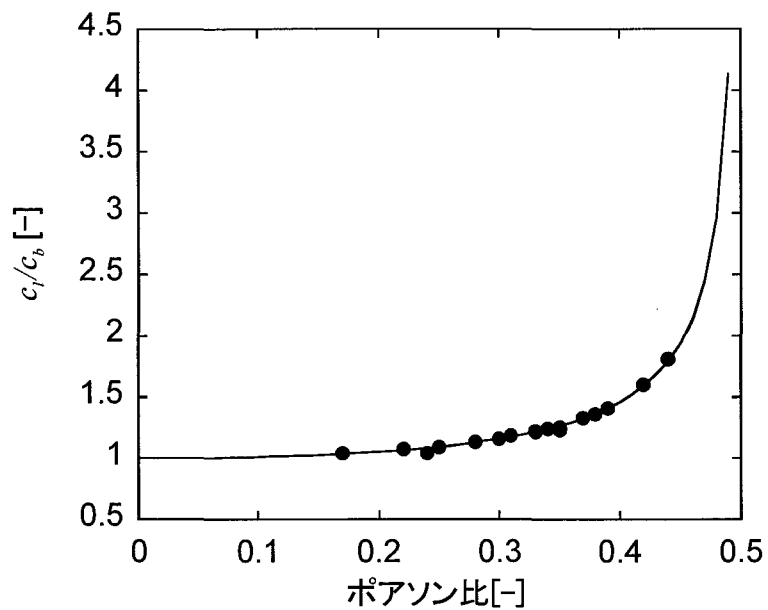
ρ : 密度 E : ヤング率 G : 剛性率 ν : ポアソン比
 c_b : 棒に沿った縦波音速 c_p : 板に沿った縦波音速 c_l : 無限媒体の縦波音速
 c_t : 無限媒体の横波音速

超音波技術便覧(実吉純一, 菊池喜充, 能本乙彦 監修, 日刊工業新聞社, pp.1325, 1991)より引用したものに c_l/c_b 項目を追加した. また原著のポアソン比の記号を σ から ν に置き換えた.

(2-43) ~ (2-45) 式を整理すると, それぞれの音速の比 c_l/c_b は,

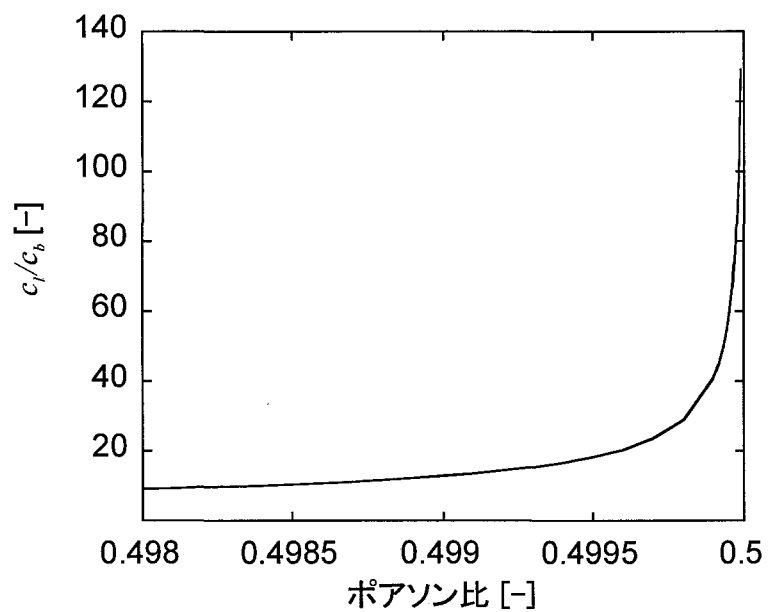
$$\frac{c_l}{c_b} = \sqrt{\frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2-46)$$

となり, ポアソン比 ν のみの関数となる. 図 2-6(a)は(2-46)式をグラフ化したものである. これより, ポアソン比 ν が零に近いほど, c_l と c_b の差が縮まり, 逆にポアソン比 ν が大きくなるほど c_l が c_b よりも大きくなり, さらに 0.5 に近づく(媒質の体積・密度が変動することで粗密波が発生することを考慮するとポアソン比が 0.5 になることはない)につれて音速比は数十倍から百数十倍にも達する. 図 2-6(a)に表 2-8 の計測結果を合わせてプロットしているが, 理論曲線によく一致している.



(a) 理論値(実線)と実測データ*(黒点)

* 超音波技術便覧(実吉純一, 菊池喜充, 能本乙彦 監修, 日刊工業新聞社, pp.1325, 1991)中の実測データを元に計算したもの



(b) ポアソン比0.5近傍

図 2-6 ポアソン比と音速比 c_l/c_b の関係

表 2-9 果菜・根菜類のポアソン比と音速比 c_l/c_b

品 名	ポアソン比	c_l/c_b	発表者
リンゴ			
ゴールドデンデリシャス	0.26(平均)	1.106	PSU*
ゴールドデンデリシャス	0.24(平均)	1.086	Chappel & Hammn (1968) *
マッキントッシュ	0.34(平均)	1.241	PSU*
レッドデリシャス	0.24(平均)	1.086	PSU*
レッドデリシャス	0.21(平均)	1.061	Chappel & Hammn (1968) *
ワインサップ	0.29(平均)	1.145	Chappel & Hammn (1968) *
サツマイモ			
こがね千貫	0.414-0.476	0.720-1.552	小島 (1974) **
パレISHO			
—	0.45(平均)	1.948	PSU*
—	0.49(平均)	4.137	Finney & Hall (1967) *
農林 2 号	0.444-0.495	1.854-5.812	小島 (1974) **
ニンジン			
5 寸	0.378-0.482	1.360-3.116	小島 (1974) **
ミニトマト	0.272(平均)	1.120	村瀬 (1991) ***

PSU: ペンシルバニア州立大学.

* 食品の物性(N.N.モーゼニン, 林 弘通 監・訳, 光琳, pp.669, 1982)より引用.

** 農産物性研究-第 2 集-(農産物性研究グループ, 農業機械学会, pp.64-65, 1985)より引用.

*** 農産物性研究-第 4 集-(農業機械学会 編, pp.69, 1991)より引用.

果菜・根菜類柔組織についても、音響波の波長によって無限媒体近似が可能である場合と、有限媒体として取り扱わなければならない場合に分けて考える必要があろう。果菜・根菜類果肉のポアソン比の計測例についてまとめたものを表 2-9 に示す。また果菜・根菜類柔組織を棒状に整形したとして、無限媒体近似との音速比 c_l/c_b を、ポアソン比から計算した結果をあわせて表 2-9 に示す。果菜・根菜類の種類によってポアソン比は 0.21～0.495 までの範囲に分布しており、この結果、音速比 c_l/c_b は 1.06～5.81 まで分布することになり、音速差が 6 倍ほどにも及ぶ。また同一種でもポアソン比に幅があるため、音速比も大きく異なる場合もある。例えば、ニンジン(品種名:五寸)では音速比が 1.36～3.12 の間に分布することになり、無限媒体近似だけでは説明できないことが明らかである。果菜・根菜類全姿を全て棒状で近似することは出来ないが、音響波が低周波になると、波長が試料サイズより十分小さいという近似が成立せず、無限媒体を仮定した理論が適用できなくなることは容易に予想することができる。

2.3.2. 等方均一有限媒体の弾性率と振動伝播速度

前章で述べたように、音速は弾性率情報を有する唯一の音響パラメータであることから、有限媒体問題でも音速と弾性率の関係について注目することになる。有限媒体の振動問題では境界条件、果菜・根菜類の振動では、形状が特に重要になってくる。従って、同じ弾性

的特性を持つ媒質からなっているとしても形状が異なれば、音速も当然異なってくる。

本研究で対象とする果菜・根菜類は様々な形状をもつ。そこで、簡単のために、ダイコンやニンジンなどの主に地中で肥大する根菜類の代表形状として丸棒を、トマトやリンゴなど主に大気中で結実・肥大する蔬菜・果樹の実を球体で近似し、それらが等方均一弾性体であるときの音速と弾性率との関係について既往の理論に基づいて整理することとする。

2.3.2.1. 等方均一完全弾性丸棒の場合

一般に棒の振動は複雑で、縦振動、横振動(湾曲振動)、ねじり振動の三種類のモードに大きく分類することができる⁴¹⁾。

(1) 縦振動

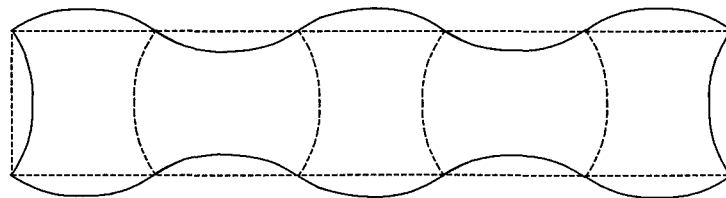
前述のように、波動進行方向の横の向きへの拘束がないため、変形様式は図 2-2 中の(c)に相当する。従って、縦振動の音速 c_b は

$$\text{音速} = \sqrt{\frac{\text{波動による変形に関する弾性率}}{\text{密度}}}$$

の関係より次式で表される。

$$c_b = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2-47)$$

これは棒内の音響波動の波長に比して棒の断面径が十分小さいとみなせる場合に成立する。しかしこの条件から外れると、つまり棒断面を徐々に太くしていくと(2-47)式よりも音速値が徐々に低下する。この原因は Field による説明⁴¹⁾が理解しやすい。棒内の縦振動の変形は図 2-2 中の(c)で示されるパターンをとるため、縦振動である伸びの波には必ず横振動であるずれ歪みが伴う(図 2-7)。縦振動と横振動は同一の速度で伝播することが要求される。波長が棒径よりはるかに大きい場合、ずれ歪みに対する復元力である剛性が相対的に小さく、縦振動が支配的な振動となるが、波長が相対的に小さくなると、剛性が無視し得えなくなる。剛性率は縦振動を支配するヤング率の 3 分の 1 であるため、横振動は縦振動より遅く、



能本乙彦:固体中の超音波(I)—超音波の振動数における固体の固有振動—(日本音響学会誌, 9(1), pp.11, 1953)より抜粋。

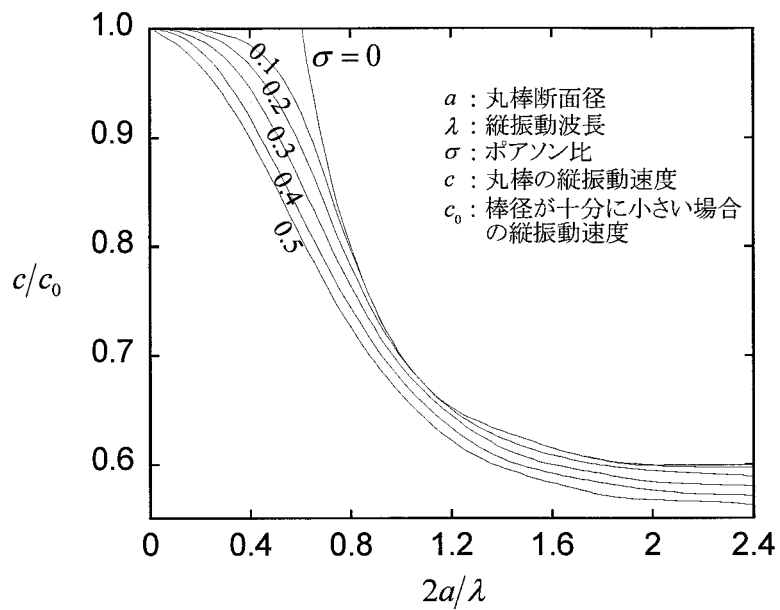
図 2-7 棒に沿った縦波にずれ歪みが伴う場合の振動様式

その遅い振動に縦振動が律速されることになる。従って、波長に比して棒径が大きくなると、つまり高周波になるほど縦振動速度は低下し、ついには横振動速度、正確には Rayleigh 速度にまで低下してしまう。この速度低下については、棒の縦振動の固有振動数に関する Rayleigh の補正式⁴¹⁾より、次のように導出される。

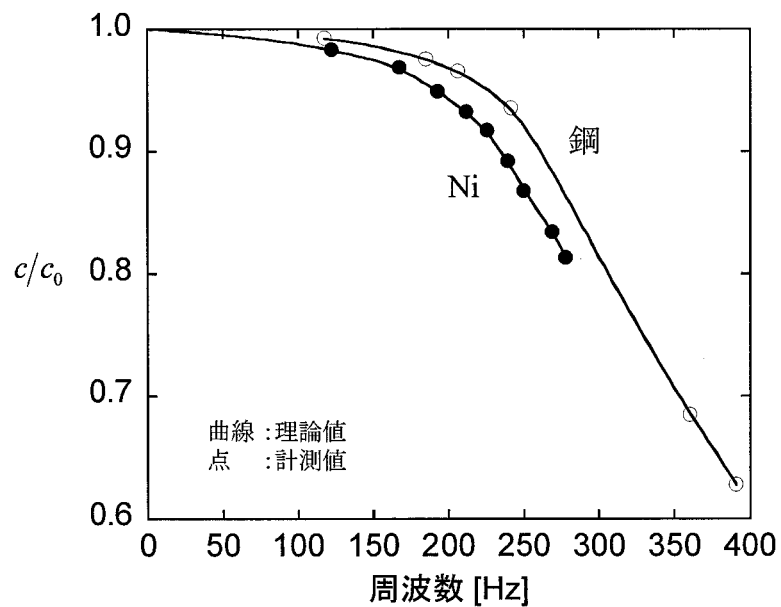
$$c_{\text{Rayleigh}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \left(1 - \frac{\pi^2 \nu^2 a^2}{\lambda^2} \right)} \quad (2-48)$$

但し、 a : 棒断面半径、 λ : 波長、 ν : ポアソン比。

Rayleigh の補正式は、棒径が波長の 2 分の 1 までの大きさである場合に成立する。棒径が波長サイズ以上の場合も含めた音速式を Ruedy, Field, Bancroft らが提唱している⁴¹⁾。それによると、棒径が波長に比して十分小さいときの縦振動伝播速度 c_0 に対する音速比 c/c_0 が、波長と棒径の比 $2a/\lambda$ との関係について図 2-8(a) のようになるという。ポアソン比を固定して考えた場合、棒径が増すにつれて音速比 c/c_0 が減少し、ついにはその比率が約 0.5 程度にまで低下してしまう。駆動周波数を変えると波長対棒径の比を変化させることができる。図 2-8(b) には、周波数と音速比の関係を示すが、図中の金属についての実測結果と極めてよく一致している。つまりこのことは音速の分散性(周波数依存性)が完全弾性体においても発現することを表している。また、波長が無限大になった場合に、理論的には音速は Rayleigh 波音速になるが、これはあくまで棒断面に波面が平面である縦振動が伝播したと仮定した場合の理論であることに留意する必要がある。実際には高周波にすると平面波ではなく球面波となり、無限媒体中の縦振動に近似されることになる。従って、波長の短い波に対しては図 2-8 の理論曲線は實際上適用不能であると言える。



(a) 丸棒に沿った縦波音速比 c/c_0 と棒径の関係に関する理論曲線*



(b) ニッケル及び鋼鉄の丸棒に沿った音速の周波数による変化*

* 能本乙彦: 固体中の超音波(I)—超音波の振動数における固体の固有振動—(日本音響学会誌, 9(1), pp.9-10, 1953)より抜粋.

図 2-8 丸棒に沿った縦波音速と波長

(2) 横振動 (transverse vibration, flexural vibration)

棒の横振動はいわゆる湾曲振動に代表される横波振動を意味する。

今、図 2-9⁴³⁾に示すように、丸棒の無限近接した横断面に切り取られた微小体積要素について考える。この棒が弱小な曲げを受ける場合、横断面に作用する内部応力はせん断力 F が主となる。このせん断力は、B 面においては $F + dF$ 、A 面には F が作用することになる。またこの体積要素には慣性力として $\rho S dx (d^2 y / dt^2)$ が作用する。ここで、 ρ : 密度、 S : 断面積、 dx : 棒軸方向の線素、 x : 丸棒の長さ方向の座標、 y : 軸と垂直な方向の座標 (撓みに相当する)。これらの力は体積要素において釣り合いを保つ必要があるため、

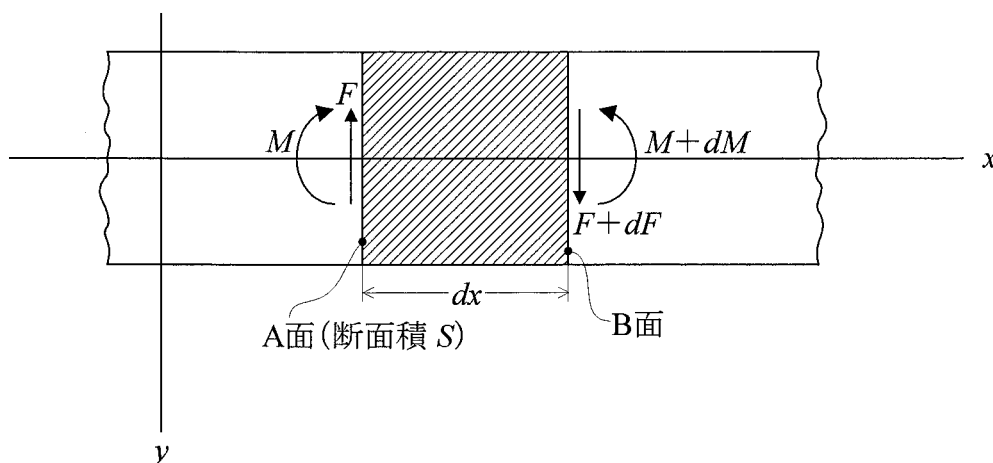
$$\begin{aligned} F + dF &= F + \rho S dx \frac{d^2 y}{dt^2} \\ \Leftrightarrow \\ dF &= \rho S dx \frac{d^2 y}{dt^2} \end{aligned} \quad (2-49)$$

が成立する。

次に B 面についてモーメントの釣り合いを考える。この場合、慣性力によるモーメントは二次の微小量⁴⁴⁾であるため、これを無視すると、次式のようになる。

$$\begin{aligned} M + F dx &= M + dM \\ \Leftrightarrow \\ F &= \frac{dM}{dx} \end{aligned} \quad (2-50)$$

また、真直はりの撓み同様、曲げモーメントと撓みには次のような微分方程式が成立する。



応用弾性学 (中原一郎, 実教出版, pp.198, 1977) より抜粋, 一部加筆。

図 2-9 丸棒の曲げ衝撃

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad (2-51)$$

但し, E :ヤング率, I :丸棒横断面の断面二次モーメント. I は次式で表される.

$$I = \frac{\pi}{4} a^4 \quad (2-52)$$

(2-50)式を x で微分したものに(2-49)式, (2-51)式, 及び(2-52)式を代入して整理すると次式を得る.

$$\frac{\pi}{4} a^4 E \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \rho S \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (2-53)$$

これは梁の横振動方程式と呼ばれる⁴³⁾.

Schaefer によれば, この振動の伝播速度 c_f は(2-53)式から次式のようになる⁴¹⁾.

$$\begin{aligned} c_f &= \frac{\pi a}{\lambda} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \\ \text{or} \\ c_f^2 &= \pi a f \sqrt{\frac{E}{\rho}} \end{aligned} \quad (2-54)$$

但し, f :振動周波数.

この横振動速度も, 棒径が波長に比して十分小さくなると, 棒横断面の回転による運動エネルギーを無視することが出来るため, 縦振動の場合と同様, 補正が必要となってくる⁴¹⁾. Rayleigh が回転による運動エネルギーを考慮した横振動の速度に関して次のような近似式を得た⁴¹⁾.

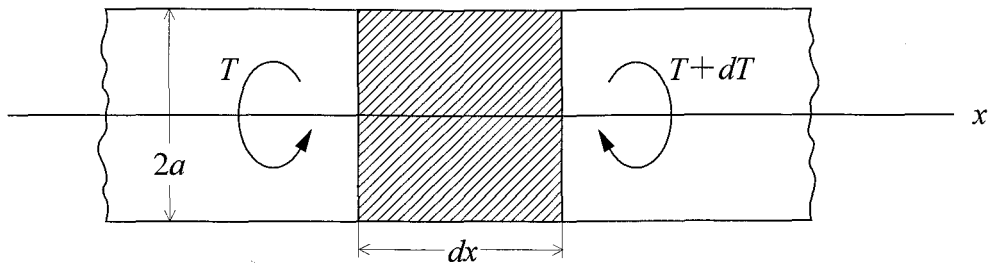
$$c_f = \frac{\left(\frac{\pi a}{\lambda}\right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi a}{\lambda}\right)^2}} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2-55)$$

(3) ねじり振動

図 2-10 に示すように, 半径 a の丸棒にトルク T が作用している場合について考える. 丸棒の区間 dx の横断面に切り取られた微小体積要素について作用するトルクは $T + dT - T = dT$ となり, これは微小体積要素の回転慣性力と釣り合う必要がある. そこで, 次式が成立する.

$$dT = \rho I_p \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} dx \quad (2-56)$$

但し, ρ :密度, I_p :断面二次極モーメント, θ :ねじれ角.



応用弾性学(中原一郎, 実教出版, pp.195, 1977)より抜粋.

図 2-10 ねじり応力の伝播

ここで, 丸棒のねじれ角は微小であり, 断面に湾曲(warping)が生じないと考えられるため, この微小体積要素に作用するトルク T は,

$$T = G \frac{d\theta}{dx} I_p \quad (2-57)$$

で表される. (2-57)式を x で微分して(2-56)式を代入・整理すると,

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (2-58)$$

を得る. このねじれの波動方程式よりねじり振動の伝播速度 c_t は,

$$c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2-59)$$

となる.

2.3.2.2. 等方均一完全弾性球体の場合

トマト, スイカ, リンゴなど主に大気中で結実・肥大する蔬菜・果樹の実は球体であることが多い. スピーカドライバによる加振やインパクトハンマによる打音解析で計測される固有振動数と弾性率, 質量, サイズとの関係を理論的に検討するために, これら果実を完全弾性球体と仮定することがしばしば行われてきた¹⁶⁾⁴⁵⁾⁴⁷⁾. Cooke ら¹⁶⁾は地球物理学の地震動理論を援用することにより完全弾性球体での振動モードについての検討を行った. 球体の振動モードは, Lamb によれば, ねじり振動と伸び縮み振動に分類することができるという¹⁶⁾. ねじり振動は, 伝播中に体積変化がなく, 球体表面に偏在する波で, 表面を打撃したあと, 同心円状に表面を伝播していく様から, toroidal wave と呼ばれることもある. 他方の球状振動は, 例えば呼吸振動のような球体あるいは楕円体状に球体が伸び縮みするモードの波で, 伝播中体積変化をもたらす. ここではこれら既往の理論を元に, 振動速度と弾性率の関係について整理を行う.

球体の振動を考える場合には、三次元問題の扱いになり、直角座標系から球座標系 (R, θ, ϕ) への変換が必要になる。これに対応するために、次式で示すように演算子を用いた運動方程式(等方均一完全弾性体)を用いることが多い⁴⁵⁾⁴⁸⁾。

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \text{grad div } \mathbf{u} \quad (2-60)$$

但し、 \mathbf{u} : 変位ベクトル, ρ : 密度, t : 時間, ∇^2 : Laplacian, λ, μ : Lamé 定数。

球体の自由振動は、球表面の応力成分が零であるという境界条件のもとで(2-60)式を解く問題に帰着する。

今、変位ベクトル \mathbf{u} を、

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_2 + \mathbf{u}_3 \\ \mathbf{u} &= \text{grad } \Phi + \text{rot rot } \boldsymbol{\varphi}_1 + \text{rot } \boldsymbol{\varphi}_2 \\ &= \text{grad } \Phi + \text{rot rot } (R\boldsymbol{\varphi}_1, 0, 0) + \text{rot } (R\boldsymbol{\varphi}_2, 0, 0) \end{aligned} \quad (2-61)$$

の形におくと、(2-60)式は $\Phi, \boldsymbol{\varphi}_1, \boldsymbol{\varphi}_2$ について波動方程式を満足するものとなる⁴⁸⁾。

これを具体的に書き下すと次式のようなになる⁴⁸⁾。

$$\begin{aligned} u_R &= \frac{\partial}{\partial R} \left[\Phi + \frac{\partial}{\partial R} (R\boldsymbol{\varphi}_1) \right] - R \nabla^2 \boldsymbol{\varphi}_1 \equiv u_{R,1} + u_{R,2} + u_{R,3} \\ u_\theta &= \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\Phi + \frac{\partial}{\partial R} (R\boldsymbol{\varphi}_1) \right] + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}_2}{\partial \phi} \equiv u_{\theta,1} + u_{\theta,2} + u_{\theta,3} \\ u_\phi &= \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \left[\Phi + \frac{\partial}{\partial R} (R\boldsymbol{\varphi}_1) \right] - \frac{\partial \boldsymbol{\varphi}_2}{\partial \theta} \equiv u_{\phi,1} + u_{\phi,2} + u_{\phi,3} \end{aligned} \quad (2-62)$$

また球径方向に垂直な面に作用する応力と変位の関係は次のようになる。

$$\begin{aligned} P_{RR} &= \lambda \text{div } \mathbf{u} + 2\mu \frac{\partial u_R}{\partial R} \\ \text{div } \mathbf{u} &= \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} (R^2 u_R) + \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin \theta u_\theta) + \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial u_\phi}{\partial \phi} \\ P_{R\theta} &= \mu \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial R} - \frac{u_\theta}{R} + \frac{1}{R} \frac{\partial u_R}{\partial \theta} \right) \\ P_{R\phi} &= \mu \left(\frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial u_R}{\partial \phi} + \frac{\partial u_\phi}{\partial R} - \frac{u_\phi}{R} \right) \end{aligned} \quad (2-63)$$

球体の振動では $\boldsymbol{\varphi}_2$ と $\Phi, \boldsymbol{\varphi}_1$ の組を別々に取り扱うことができ⁴⁹⁾、それぞれねじり振動と伸び縮み振動に対応している。

(1) ねじり振動

ϕ_2 についてのみ考えればよいから、変位ベクトル成分は次のようになる。

$$\begin{aligned} u_R &= 0 \\ u_\theta &= \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial \phi_2}{\partial \phi} \\ u_\phi &= -\frac{\partial \phi_2}{\partial \theta} \end{aligned} \quad (2-64)$$

これを(2-63)式に代入すると、径方向に垂直な面の応力は次のようになる。

$$\begin{aligned} P_{R\theta} &= \mu \frac{R}{\sin \theta} \frac{\partial^2}{\partial R \partial \phi} \left(\frac{\phi_2}{R} \right) \\ P_{R\phi} &= -\mu R \frac{\partial^2}{\partial R \partial \theta} \left(\frac{\phi_2}{R} \right) \end{aligned} \quad (2-65)$$

今、球体表面応力は零となるため、(2-65)式を零とおいて整理すると次式を得る。

$$\left[\frac{\partial}{\partial R} \left(\frac{\phi_2}{R} \right) \right]_{R=a} = 0 \quad (2-66)$$

但し、 a : 球体半径。

ϕ_2 についての Helmholtz 方程式の解と球ベッセル関数に関する関係式

$$\frac{d}{dz} j_n(z) = \frac{n}{z} j_n(z) - j_{n+1}(z) \quad (2-67)$$

を(2-66)式に代入・整理すると、

$$\begin{aligned} \left[\frac{d}{dR} \left(\frac{j_n(kR)}{R} \right) \right]_{R=a} &= \frac{1}{a^2} \{ (n-1)j_n(ka) - ka j_{n+1}(ka) \} = 0 \\ \Rightarrow \\ \frac{j_{n+1}(ka)}{j_n(ka)} &= \frac{n-1}{ka} \\ ka &= \omega a \sqrt{\frac{\rho}{\mu}} \end{aligned} \quad (2-68)$$

なる特性式を得る。 n は次数 (order number) と呼ばれ、これが与えられると(2-68)式を満足する根 ka (無次元固有振動数) が定まる。 ka は理論上無限個数あり、根を小さいものから番号をつけ、それをモード数 (mode number) と呼ぶ。この無次元固有振動数 ka と次数、モード数の関係を表 2-10¹⁶⁾ に例示する。竹内⁵⁰⁾⁵¹⁾ は n が十分大きいとき球体表面の振動の波数が $n+1/2$ になることを見出した。従って、この振動の波長を L とすると $L = 2\pi a / (n+1/2)$ となり、位相速度 c_l は次のように定義できる。

表 2-10 均一完全弾性球体のねじり振動の無次元固有振動数 ka

i	n=1	n=2	n=3	n=4	n=5
0	0.0000	2.5011	3.8647	5.0946	6.2658
1	5.7635	7.1360	8.4449	9.7125	10.9506
2	9.0950	10.5146	11.8818	13.2109	14.5109
3	12.3229	13.7717	15.1754	16.5445	17.8858

i: モード数 n: 次数

Cooke, J.R and R.H. Rand : A mathematical study of resonance in intact fruits and vegetables using a 3-media elastic sphere model (*Journal of Agricultural Engineering Research*, 18, pp.144, 1973) より抜粋.

$$c_t = \frac{L}{T} = fL = \frac{2\pi f}{n + \frac{1}{2}} a = \frac{\omega a}{n + \frac{1}{2}} \quad (2-69)$$

但し, f : 周波数, ω : 角周波数. 小さい n についても, 次数と位相速度を結びつける式として (2-69) 式が近似的に用いられる⁴⁹⁾.

(2-68) 式中の $\sqrt{\mu/\rho}$ は無限媒体中の横波音速 c_s に等しい. また, 表 2-10 の n 次でモード数 i の時の根 ka を ${}_i\eta_n$ とすると,

$${}_i\eta_n = ka = \frac{\omega}{c_s} a \quad (2-70)$$

となる. (2-69) 式と (2-70) 式より ω , a を消去すると次の関係を得る.

$$c_t = \frac{{}_i\eta_n}{n + \frac{1}{2}} c_s = \frac{{}_i\eta_n}{n + \frac{1}{2}} \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2-71)$$

次数とモード数が定まれば, (2-71) 式中の ${}_i\eta_n/(n+1/2)$ は定数になり, ねじり振動の伝播速度 c_t は μ , つまり剛性率 G (ヤング率 E の 3 分の 1) の平方根に比例する.

(2) 伸び縮み振動

Φ と φ_1 についてのみ考えればよいから、変位ベクトル成分は次のようになる。

$$\begin{aligned} u_R &= \frac{\partial}{\partial R} \left[\Phi + \frac{\partial}{\partial R} (R\varphi_1) \right] - R\nabla^2 \varphi_1 \\ u_\theta &= \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\Phi + \frac{\partial}{\partial R} (R\varphi_1) \right] \\ u_\phi &= \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \left[\Phi + \frac{\partial}{\partial R} (R\varphi_1) \right] \end{aligned} \quad (2-72)$$

球径方向に垂直な面に作用する応力と変位の関係式の(2-63)式に代入し、 $R = a$ で表面応力が零なる境界条件を適用することで、次のような特性方程式を得る⁴⁵⁾。

$$\begin{aligned} & \frac{4\gamma}{\xi} \left[1 + \frac{(n-1)(n+2)}{\xi} \left\{ \frac{j_{n+1}(\xi)}{j_n(\xi)} - \frac{n+1}{\xi} \right\} \right] \frac{j_{n+1}(\gamma\xi)}{j_n(\gamma\xi)} \\ & - \left[1 - \frac{2(n-1)(2n+1)}{\xi^2} - \frac{2}{\xi} \left\{ 1 - \frac{2n(n-1)(n+2)}{\xi^2} \right\} \frac{j_{n+1}(\xi)}{j_n(\xi)} \right] = 0 \end{aligned} \quad (2-73)$$

$$\xi = ka = \omega a \sqrt{\frac{\rho}{\mu}}$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{\mu}{\lambda + 2\mu}}$$

ねじり振動同様、この特性式の根 ξ も無限個数ある。この無次元固有振動数 ξ と次数、モード数の関係をポアソン比 σ 別に整理したものを表 2-11¹⁶⁾示す。また0次と2次の振動モードの模式図を図 2-11に示す(1次モードは存在しない¹⁶⁾)。伸び縮み振動においても、その位相速度 c_{sp} と次数の関係は(2-69)式と同形式となる⁴⁹⁾。

$$c_{sp} = \frac{\omega a}{n + \frac{1}{2}} \quad (2-74)$$

n 次でモード数 i の時の根を ${}_i\xi_n$ とすると、

$${}_i\xi_n = ka = \frac{\omega}{c_s} a \quad (2-75)$$

となる。(2-69)式と(2-70)式より ω 、 a を消去すると次の関係を得る。

$$c_{sp} = \frac{{}_i\xi_n}{n + \frac{1}{2}} c_s = \frac{{}_i\xi_n}{n + \frac{1}{2}} \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2-76)$$

ねじり振動の場合とは異なり、(2-76)式中の係数 ${}_i\xi_n/(n+1/2)$ は次数、モード数以外に、ポアソン比も固定しないと定数とはならない。表 2-11より ${}_i\xi_n$ はポアソン比が0から0.5まで変動させても10%以下の変動であるが、同種の農産物でのポアソン比変動はそれほど大きくないことから、農産物で考えた場合、ポアソン比による ${}_i\xi_n$ の変動はさらに小さくなる。また、

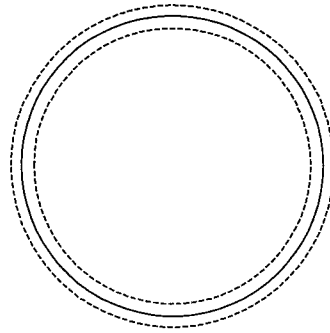
0 次モードではポアソン比による ${}_i\xi_n$ 変動はさらに大きい¹⁶⁾が、農産物の打音法を考えると、0 次の呼吸振動は考慮しなくてもよい。従って、伸び縮み振動の伝播速度 c_{sp} も μ 、つまり剛性率 G (ヤング率 E の 3 分の 1)の平方根にほぼ比例するとしても問題はないと考えられる。

表 2-11 均一完全弾性球体の伸び縮み振動の無次元固有振動数 ξ

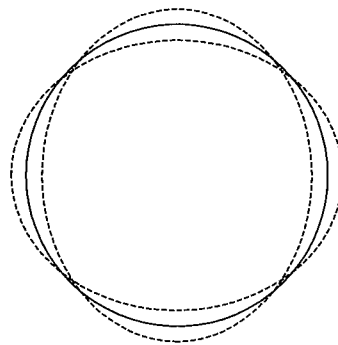
i	ν	n=0	n=2	n=3	n=4
0		${}_0S_0$	${}_0S_2$	${}_0S_3$	${}_0S_4$
	0.0	2.9438	2.5921	3.7640	4.7610
	0.1	3.3977	2.6152	3.8360	4.8747
	0.2	4.0180	2.6327	3.8927	4.9689
	0.3	4.9955	2.6462	3.9374	5.0460
	0.4	7.0952	2.6569	3.9731	5.1092
1	0.5		2.6656		5.1608
		${}_1S_0$	${}_1S_2$	${}_1S_3$	${}_1S_4$
	0.0	8.4010	4.1159	5.6443	7.2111
	0.1	8.9700	4.4129	5.9597	7.5475
	0.2	9.8458	4.7171	6.2920	7.8959
	0.3	11.3971	5.0070	6.6086	8.2147
2	0.4	15.1225	5.2619	6.8811	8.4745
	0.5		5.4730		8.6737
		${}_2S_0$	${}_2S_2$	${}_2S_3$	${}_2S_4$
	0.0	13.0190	7.3067	8.8027	10.1642
	0.1	13.8458	7.6340	9.1069	10.4555
	0.2	15.1238	8.0884	9.5024	10.8375
3	0.3	17.4004	8.5272	9.8824	11.2250
	0.4	22.9103	8.7591	10.1362	11.5163
	0.5		8.8772		11.7185
		${}_3S_0$	${}_3S_2$	${}_3S_3$	${}_3S_4$
	0.0	17.5425	9.0494	10.6252	12.1989
	0.1	18.6339	9.4699	10.8406	12.4908
4	0.2	20.3230	9.4539	11.3017	13.0631
	0.3	23.3374	10.3759	12.4277	14.1626
	0.4	30.6503	12.0138	13.4255	14.8026
	0.5		12.1607		14.9754

${}_iS_n$: モード数 i , 次数 n の伸び縮み振動 ν : ポアソン比

Cooke, J.R and R.H. Rand : A mathematical study of resonance in intact fruits and vegetables using a3-media elastic sphere model (*Journal of Agricultural Engineering Research*, 18, pp.144, 1973) より抜粋。



(a) ${}_0S_0$ モードの振動をしている球体断面



(b) ${}_0S_2$ モードの振動をしている球体断面

図 2-11 均一完全弾性球体の 0 次及び 2 次の伸び縮み振動様式

2.3.3. 果菜・根菜類柔組織の扱い

有限媒体においても、基本的に前述した無限媒体での議論をそのまま適用できる。例えば弾性体近似については、有限媒体の場合、無限媒体で想定される高周波振動に比して吸収が低いため、(2-41)式の $\alpha c/\omega$ は、表 2-6 中の計算値よりも小さくなり、有限弾性体として扱っても大きな影響はないと言える。

しかし、等方性・均一性に関しては、無限媒体と事情が異なる。有限媒体では、前述のようにヤング率、剛性率などが支配的な振動様式である。果菜・根菜類柔組織の主成分である細胞内液についてはこれらの弾性率が原理的に零であることから、柔組織でこれらの物性値の発現を担うのは、細胞液ではなく細胞壁や膨圧であると考えられる⁵²⁾⁵³⁾。このため細胞形状やサイズにより弾性率が異なってくる可能性がある。

まず均一性について考えてみる。無限媒体の場合と同様、柔組織中の振動伝播現象を考える場合、系の特性長さは振動波長と考えるのが合理的である。仮に物性値の空間変動の波長を細胞の大きさとする、波長が細胞サイズよりも十分に大きく、かつ細胞形状・サイズの分布に偏りが無い場合、統計的な均一性を仮定できる。先に表 2-4 で示したように、果

菜・根菜類柔組織内での超音波(110kHz)の波長は 1~3mm 程度と見積もられるが、有限媒体中の振動波は超音波よりもさらに低周波・長波長であると考えられることから、波長が細胞よりも相対的に大きいものとなり、統計的均一性の必要条件は満足するものと考えられる。

次に等方性について考える。Vincent ら⁵⁴⁾や Khan ら⁵⁵⁾は、リンゴ果肉の破断強度計測では、径方向と軸方向との間に差異が認められるため、果菜・根菜類果肉の力学物性計測結果には、圧縮・引張方向を明記することの必要性を述べている。このことはヤング率・剛性率支配の振動を考えた場合においても、厳密には異方性があることを考慮する必要があることを意味している。しかし、異方性を考慮すると、振動伝播特性に関与する弾性率パラメータが増えて理論式が複雑になる上、細胞レベルでの *in vitro* 弾性率計測の研究がようやく緒についたばかり⁵⁶⁾で、検証の手段がほとんどないに等しい現状では、異方性を考慮した解析は非常に困難であると言える。

Khan ら⁵⁵⁾によれば、リンゴ果肉のみかけのヤング率は、軸方向が径方向より 20%程度大きい、バレイショでは方向による差がなく、ほぼ等方性が成り立つという。このように果菜・根菜類可食部の柔組織では、茎部や木材のように強靱な繊維が走向していないため、方向による弾性率の差はせいぜい数十%程度で、数倍にも及ぶことはないと考えられる。そこで本研究においては、果菜・根菜類柔組織に等方性があるものとして解析することとする。但し、計測においては同一品種の試料については計測方向の統一が必要であろう。

以上より、本論文では以降、有限媒体で考える場合にも等方均一有限弾性媒体として扱い、前節で述べた各種振動モードにおける音速と弾性率の関係をもとにした考察を行うこととする。

2.3.4. 有限媒体中の振動伝播速度から得られる弾性情報

有限媒体中の振動伝播速度と弾性率の関係は、媒体の形状(境界条件)及び振動モードにより異なる。農産物の形状を丸棒と球体に近似して、各種振動モードによる振動伝播速度と動的弾性率の関係をまとめると表 2-12 のようになる。いずれも振動伝播速度は $\sqrt{E'/\rho}$ もしくは $\sqrt{G'/\rho}$ 項を含むため、概括すれば、弾性率 E' や G' が大きいほど音速は大きくなる傾向にあると言える。しかしそれらの項には波長やモード数からなる係数が付いているため、さらに言えば音速には分散性(周波数依存性)があるということになる。

この係数が一定とみなせる場合、つまり農産物の代表長さ L と波長 λ の比が一定であるならば、表 2-12 の式は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} c_f &\propto \sqrt{\frac{E'}{\rho}} \\ &\propto \sqrt{\frac{G'}{\rho}} \end{aligned} \quad (2-77)$$

但し、 E' :動的ヤング率、 G' :動的ヤング率を表す。

これは無限媒体の節で述べたように、農産物個々の密度の変動が弾性率の変動よりも小さく、同じ振動モードの音速は弾性率 E' や G' に支配されることになり、音速を計測することでそれらの弾性率の情報を得ることができると考えられる。同一品種の農産物の選別作業を想定すると、農産物の径や最大長等で選別された後、周波数別の位相速度を測定することで、(2-77)式を近似的に適用できる可能性がある。また、農産物の打音法で行われる代表長さによる固有振動数の正規化⁵⁷⁾と同様に、試料の代表長さや振動周波数による音速の正規化を行うことで、弾性率に関するパラメータを導入することも可能であると考えられる。

表 2-12 有限媒体中の各種振動モードの振動伝播速度と弾性率

媒体形状	振動モード	振動伝播速度式
丸棒	縦振動	$c_{Rayleigh} = \sqrt{\frac{E'}{\rho} \left(1 - \frac{\pi^2 \nu^2 a^2}{\lambda^2} \right)}$ $c_b = \sqrt{\frac{E'}{\rho}} \quad (\text{棒径} \ll \text{波長の場合})$
	横振動	$c_f = \frac{\frac{\pi a}{\lambda}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi a}{\lambda} \right)^2}} \sqrt{\frac{E'}{\rho}}$ $c_f = \frac{\pi a}{\lambda} \sqrt{\frac{E'}{\rho}} \quad (\text{棒径} \ll \text{波長の場合})$
	ねじり振動	$c_t = \sqrt{\frac{G'}{\rho}}$
球体	ねじり振動	$c_t = \frac{{}_i\eta_n}{n + \frac{1}{2}} \sqrt{\frac{G'}{\rho}}$ <p>(次数とモード数が決まれば $\frac{{}_i\eta_n}{n + 1/2}$ は一定.)</p>
	伸び縮み振動	$c_{sp} = \frac{{}_i\xi_n}{n + \frac{1}{2}} \sqrt{\frac{G'}{\rho}}$ <p>(次数, モード数, ポアソン比が一定の場合 $\frac{{}_i\xi_n}{n + 1/2}$ は一定.)</p>

第4節 まとめ

農産物の硬さについて、工業用材料の定義と同じく、一定の変形をもたらすのに必要な力という定義が農業工学、食品科学分野においても一般的であり、本研究では農産物の硬さとして圧縮試験によって得られるみかけの弾性率を用いることとした。

さらに、農産物柔組織が等方均一性の弾性体であるという仮定をおいて、弾性率と音速の関係について弾性理論に基づいて考察を行った結果、以下に示す予測を得た。

- 1) 100kHz 以上の超音波の果菜・根菜類柔組織内伝播を考えた場合、その波長が数 mm 程度になり、事実上果菜・根菜類の実を無限媒体として扱うことができる。
- 2) 無限媒体近似となる超音波法では、その縦波音速は体積弾性率支配であり、硬さを代表するヤング率が音速に及ぼす影響はほとんどないことが推定される。
- 3) 打音法に代表される数 kHz 以下の可聴域の場合、その波長は超音波よりも大きく、無限媒体としての近似が困難になり、有限媒体としての扱いとなる。
- 4) 有限媒体中の振動という扱いとなる打音法では、その振動音速は、振動モードや周波数により音速値は異なるものの、同一形状をした同じ品種の農産物においては、振動伝播速度はヤング率・剛性率が支配的なパラメータとなり、速度から逆に硬さを推定できる可能性があることが予測される。

参考文献

- 1) 星野公三：固体はなぜ固いか，丸善，pp.7 (1996)
- 2) 堀 秀道：楽しい鉱物学，草思社，pp.17-28 (1990)
- 3) 日本規格協会編：JIS 工業用語大辞典，日本規格協会，pp.299 (1995)
- 4) 高分子学会編：高分子材料便覧，コロナ社，pp.335 (1973)
- 5) Mohsenin, N. N. 著，林 弘通監訳：食品の物性，光琳，pp.315-369 (1982)
- 6) 種谷真一，林 弘通，川端晶子：食品物性用語辞典，養賢堂，pp.42 (1996)
- 7) Szczesniak, A. S. : Classification of texture characteristics, Journal of Food Science, 28(4), pp.385-389 (1963)
- 8) Szczesniak, A. S. : Texture measurements, Food Technology, 20, pp.1292-1298 (1966)
- 9) 種谷真一，林 弘通，川端晶子：食品物性用語辞典，養賢堂，pp.118-119 (1996)
- 10) 日本規格協会編：JIS 工業用語大辞典，日本規格協会，pp.844 (1995)
- 11) 石橋貞人：青果物の力学的特性，農産物性研究(第2集)農産物の物性及び測定法に関する総合的研究，農業機械学会農産物性研究グループ，pp.56-92 (1985)
- 12) Arnold, P. C. and N. N. Mohsenin : Proposed techniques for axial compression tests on intact agricultural products of convex shape, Transactions of the ASAE, 14(1), pp.78-84 (1971)
- 13) 杉山純一：メロンの携帯型非破壊果肉硬度計の開発と生長計測，フレッシュフードシステム, 26(9), pp.22-27 (1997)
- 14) Finney, E. E. : Dynamic elastic properties of some fruits during growth and development, Journal of Agricultural Engineering Research, 12, pp.249-256 (1967)
- 15) Abbott J. A., Bachman, G. S., Childers, R. F., Fitzgerald, J. F. and F. J. Matusik : Sonic techniques for measuring texture of fruits and vegetables, Food Technology, 22, pp.635-646 (1968)
- 16) Cooke, J. R. and R. H. Rand : A mathematical study of resonance in intact fruits and vegetables using a 3-media elastic sphere model, Journal of Agricultural Engineering Research, 18, pp.141-157 (1973)
- 17) Lovasz, T., Salgo, A. : Investigation of the apple quality by near infrared technique, Near Infra-red Spectroscopy -Bridging the Gap between Data Analysis and NIR Applications, Ellis Horwood Limited, pp.365-370 (1992)
- 18) 実吉純一，菊池喜充，能本乙彦：超音波技術便覧，日刊工業新聞社，pp.937-943 (1991)
- 19) 根岸勝雄，高木堅志郎：超音波技術，東京大学出版会，pp.166-168 (1984)
- 20) 野村浩康，川泉文男，香田 忍：液体および溶液の音波物性，名古屋大学出版会，pp.23-30 (1994)
- 21) 和田八三久，生嶋 明：超音波スペクトロスコーピー[基礎編]，培風館，pp.5-8 (1990)

- 22) 大塚正久 訳 : セル構造体—多孔質材料の活用のために—, 内田老鶴圃, pp.35 (1993)
- 23) 牧島邦夫, 篠原靖忠, 小森尚志 共訳 : 計量形態学—マイクロ組織をはかる—, 内田老鶴圃, pp.132-135 (1983)
- 24) Mohsenin, N. N. 著, 林 弘通 監訳 : 食品の物性, 光琳, pp.639-640 (1982)
- 25) 堀 素夫 : 不均一材料の物性に関する統計理論, 応用物理, 40(1), pp.2-16 (1971)
- 26) 平井宏昭, 穂波信雄 : 超音波による植物生体内部情報計測—果菜類の伝播速度と減衰特性—, 第 49 回農業機会学会年次大会講演要旨, pp.179-180 (1990)
- 27) 根岸勝雄, 高木堅志郎 : 超音波技術, 東京大学出版会, pp.153-154 (1984)
- 28) 理論地震動研究会 編著 : 地震動—その合成と波形処理—, 鹿島出版会, pp.25-26 (1994)
- 29) Mohsenin, N. N. 著, 林 弘通 監訳 : 食品の物性, 光琳, pp.87-110 (1982)
- 30) 松本幸雄 : 食品の物性とは何か, 弘学出版, pp.37-69 (1991)
- 31) 斎藤信彦 : 高分子物理学, 裳華房, pp.252-283 (1967)
- 32) 和田八三久 : 高分子の物性工学, オーム社, pp.305-312 (1967)
- 33) 和田八三久 : 高分子の固体物性, 培風館, pp.403-413 (1971)
- 34) 実吉純一, 菊池喜充, 能本乙彦 監修 : 超音波技術便覧, 日刊工業新聞社, pp.963-965 (1991)
- 35) 中川鶴太郎 : レオロジー, 岩波全書, pp.37 (1978)
- 36) 野村浩康, 川泉文男, 香田 忍 : 液体および溶液の音波物性, 名古屋大学出版会, pp.13 (1994)
- 37) 実吉純一, 菊池喜充, 能本乙彦監修 : 超音波技術便覧, 日刊工業新聞社, pp.1202 (1991)
- 38) 実吉純一, 菊池喜充, 能本乙彦監修 : 超音波技術便覧, 日刊工業新聞社, pp.444 (1991)
- 39) 西津貴久, 池田善郎 : 音波による果菜類の品質評価に関する基礎的研究(第2報)—果菜類柔組織の組織内ガスが縦波音速と弾性的特性に及ぼす影響—, 農業機械学会誌, 63(3), pp.74-83 (2001)
- 40) 実吉純一, 菊池喜充, 能本乙彦 監修 : 超音波技術便覧, 日刊工業新聞社, 14-15 (1991)
- 41) 能本乙彦 : 固体中の超音波 (I) 超音波の振動数における固体の固有振動, 日本音響学会誌, 9(1), 3-32 (1953)
- 42) 実吉純一, 菊池喜充, 能本乙彦 監修 : 超音波技術便覧, 日刊工業新聞社, 1324-1325 (1991)
- 43) 中原一郎 : 応用弾性学, 実教出版, pp.198 (1977)
- 44) 川田雄一 : 機械工学講座 1「材料力学」, 共立出版, pp.32 (1960)
- 45) Yamamoto, H. and S. Haginuma : Estimation of the dynamic Young's modulus of apple

- flesh from the natural frequency of an intact apple, Report of National Food Research Institute, 44, pp.20-25 (1984)
- 46) 中馬 豊, 志賀 徹, 疋田慶夫 : 振動・衝撃利用による果実の内部品質判定(第 1 報)—スイカ果実の共振周波数と内部組成—, 農業機械学会誌, 39(3), pp.335-341 (1977)
 - 47) 陳 介余, 宮里 満, 石黒悦爾 : 振動特性による農産物の内部品質の判定(第 1 報)—スイカの内部品質と振動周波数—, 農業機械学会誌, 55(3), pp.65-72 (1993)
 - 48) 力武常次, 佐藤良輔, 萩原幸男 : 物理数学Ⅱ 地球科学を主体として(応用編), 学会出版センター, pp.1-8 (1980)
 - 49) 力武常次, 佐藤良輔, 萩原幸男 : 物理数学Ⅱ 地球科学を主体として(応用編), 学会出版センター, pp.43-46 (1980)
 - 50) 竹内 均 : 地球のねじり振動, 地震, 11(2), pp.68-75 (1958)
 - 51) 竹内 均, 小林直太 : 地球のねじれ振動(第 3 報)—附 : 月のねじれ振動—, 地震, 14(2), pp.89-93 (1961)
 - 52) Pitt, R. E. : Models for the rheology and statistical strength of uniformly stressed vegetative tissue, Transactions of the ASAE, 25(6), pp.1776-1784 (1982)
 - 53) 梅田幹雄, 並河 清, 長坂善禎, 本村知睦, 中原高伸 : 十四面体模型細胞の力学特性(第 1 報)—模型細胞単体の圧縮反力解析—, 農業機械学会誌, 59(5), pp.55-62 (1997)
 - 54) Vincent, J. F. V. : Relationship between density and stiffness of apple flesh, Journal of the Science of food and agriculture, 47, pp.443-462 (1989)
 - 55) Khan, A. A. and J. F. V. Vincent : Anisotropy of apple parenchyma, Journal of the Science of food and agriculture, 52, pp.455-466 (1990)
 - 56) 重田一人, 大谷隆二, 長坂善禎, 谷脇 憲 : 微小生体構成物質の物性計測に関する研究(第 1 報)—AFM マイクロカンチレバーのバネ定数計測—, 農業機械学会誌, 62(6), pp.50-57 (2000)
 - 57) Jancsok P., Papadiamontopoulou E., De Baerdemaeker J. and B. Nicolai : Effect of shape on the acoustic response of conference pears -a finite element modelling approach, Proceedings of the AgEng Oslo98 conference, 98-F-007 (1998)

第3章 果菜・根菜類の組織内ガスと気泡分散系理論

第1節 はじめに

植物組織一般に、呼吸活動のための通気組織として細胞間隙がある¹⁾。この細胞間隙には呼吸活動やその他の生理活動の結果生じ、取り残されたガスが存在している。果菜・根菜類では、このガス量は実の肥大に伴い増加し、また収穫後も呼吸活動や蒸散作用によってさらに増加していく。

一方、矢野ら²⁾は分散系食品の力学的特性・熱物性に関する一連の研究の中で、気泡分散系食品ゲルの各種弾性率が気泡の体積分率に影響を受けることを指摘している。このことから、果菜・根菜類の細胞実質固有の弾性率が同じでも組織内ガス体積分率が異なればみかけの弾性率も異なってくる可能性があり、前章で述べた弾性率と音速の関係にどのような影響をもたらすのかを検討しておく必要がある。

この章では果菜・根菜類の組織内ガスが弾性率と音速に及ぼす影響について、矢野ら²⁾や岡野ら³⁾の気泡分散系理論を適用して考察する。

第2節 果菜・根菜類の柔細胞と柔組織

3.2.1. 柔組織の構造

生物体はすべて細胞から構成されている。細胞はあくまで形態的・生理的構造のユニット(単位)であり⁴⁾、力学的特性を考慮する際の重要性については別に議論のあるところであるが、少なくとも構造を把握する上では有効なユニットであることは間違いない。

植物細胞は一般に表 3-1 のように類型化される。その中で、果実果肉や根菜類の塊茎・塊根などの可食部分の細胞は柔細胞(parenchymatous cell)に相当する。柔細胞は細胞壁の薄い多面体をした細胞⁴⁾で、通常の植物細胞とほぼ同じ構造を持ち、細胞壁、原形質、液胞、細胞含有物からなる。

柔組織の細胞壁の多くは、その生成過程で一次細胞壁のままでとどまる⁴⁾ために薄く、多汁質果実では細胞径 500 μm に対して細胞壁厚さは 1 μm 以下である⁵⁾。

原形質(protoplasm)あるいは原形体(protoplast)は、核と細胞質(リボソーム(ribosome)、ミトコンドリア(mitochondria)、ゴルジ体(Golgi apparatus)、プラスチッド(plastid)等)及び成分のほとんどが水である細胞質基質(cytosol)から構成される。

液胞は一般に植物細胞では最大のオルガネラであり、特に柔細胞の場合、細胞容積のほとんどを液胞が占めるのが特徴である⁴⁾⁶⁾⁷⁾。十分に成熟した柔細胞においては、小液胞が融合して大きな中央液胞(central vacuole)となり、エクトプラスト(原形質膜, ectoplast)とトノプラスト(液胞膜, tonoplast)の間に存在する液胞以外の原形質は中央液胞の周辺に押しやられたような状態になっている⁸⁾。液胞内には原形質の生理活動の結果生産された有機・無機物質の水溶液からなる細胞液(cell sap)で満たされている⁴⁾。

細胞含有物(cell inclusions)は原形質の物質代謝の結果生産され、細胞内に貯蔵される

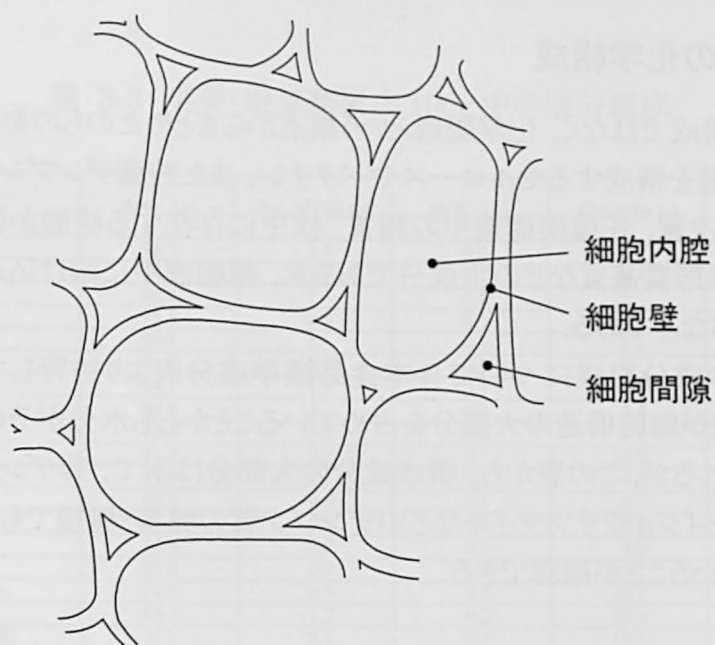
表 3-1 植物細胞の種類

細胞の種類	特徴・役割
分裂細胞	分裂の機能を持つ細胞. ほぼ立方体の小形の細胞で, 細胞壁が薄く, 内部は原形質で充満している.
柔細胞	細胞壁の薄い多面体をした大形の細胞で, 細胞間隙を持っている. 内部には大きな液胞がある.
表皮細胞	植物体の表面を覆う細胞. 細胞壁にクチンを沈積して, クチクラ(角皮)をつくることがある.
コルク細胞	茎や根の古い部分の表皮が取れた後に形成される細胞. 細胞壁のミドルラメラやセルロースにスベリンが沈積されている. 通常扁平で比較的細胞壁が薄く, 細胞間隙がない.
機械的細胞	細胞壁が肥厚・変質して植物体の体制維持の役割を果たす細胞.
厚角組織	厚角組織(collenchyma)をつくる細胞. 原形質が生きている場合が多い.
繊維細胞	細胞壁が木化(lignification)を起こし, 細胞壁にリグニンが沈積し, 非常に強固. 原形質は死滅している.
石細胞	細胞壁が木化したもので, 繊維細胞のように長く伸びていない.
通道細胞	植物体内における物質移動に利用される.
仮道管	細長く伸びた一つの細胞で, 細胞壁は木化している.
道管	一つの細胞ではなく, 両端の細胞壁の消失した円筒形の細胞が多数連結してできている. 細胞壁は肥厚し, 木化している.
篩管	両端の細胞壁が肥厚し, 孔隙をもった円筒形の細胞がいくつか縦に連なったもの.

植物生理学大要(田口亮平, 養賢堂, pp.44-47, 1998)より抜粋整理した.

デンプン粒, 糊粉粒, 油脂, タンニン, シュウ酸カルシウム結晶粒等を指す. 本研究の対象である果実や根菜類の塊茎・塊根では特に, バレイショやカンショなどの細胞に貯蔵されるデンプン粒がこれにあたる.

可食部は柔細胞が集合したもので一般に柔組織と呼ばれる. 図 3-1 に典型的な柔組織(parenchyma)を示す. この図では細胞内腔が省略されているが, 前述のように柔細胞では液胞が細胞の大部分を占めているため, 実際には光学顕微鏡による柔組織観察結果(図 3-2)とよく似ている. 細胞は密な充填構造ではなく, 細胞間には細胞間隙(intercellular space)と呼ばれる空隙が存在している. 空隙内には生理活動の結果生じた水蒸気, 酸素, 二酸化炭素, 窒素などのガス体と少量の液相の水が存在する.



植物生理学大要(田口亮平, 養賢堂, pp.44, 1998)を参照して作図.

図 3-1 典型的な柔細胞

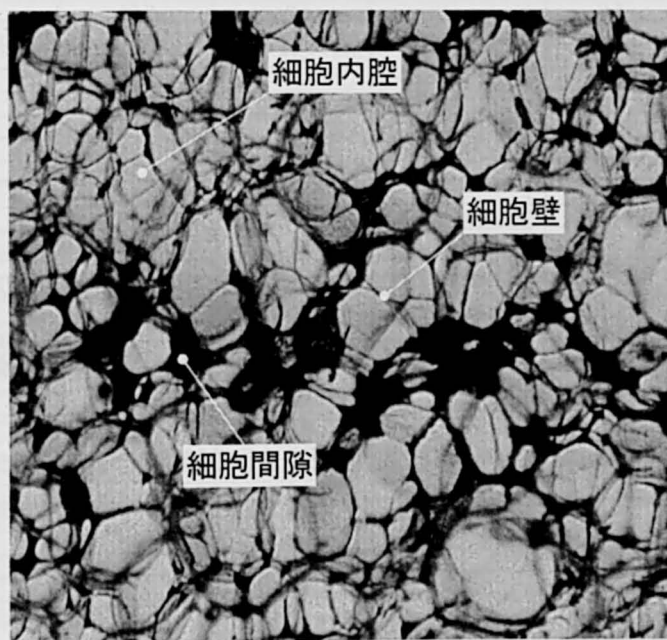


図 3-2 ダイコン柔組織の実体顕微鏡写真

3.2.2. 柔組織の化学組成

次に視覚的な構成ではなく、化学組成という観点からまとめたものを表 3-2 に示す。有機化合物は細胞壁を構成するセルロースやペクチン、また貯蔵デンプン粒などの炭水化物、酵素などのタンパク質、各種膜構造中の脂質、核中に存在する核酸から構成される。無機化合物は液胞、原形質基質などの主成分である水、細胞液中に溶け込んでいる塩類、そして空隙中のガス体などである。

果菜・根菜類の成分組成について日本食品標準成分表より抜粋してまとめたものを表 3-3 に示す。液胞が細胞構造の大部分を占めていることから水分がそのほとんどを占めていることが予想されるが、この表から、構成成分の大部分は水で、非デンプン質の果実果肉で 80%以上、バレイショやサツマイモなどのデンプン質の塊茎・塊根でもおよそ 70%程度が水から成り立っていることが確認できる。

表 3-2 植物体を構成する化学組成

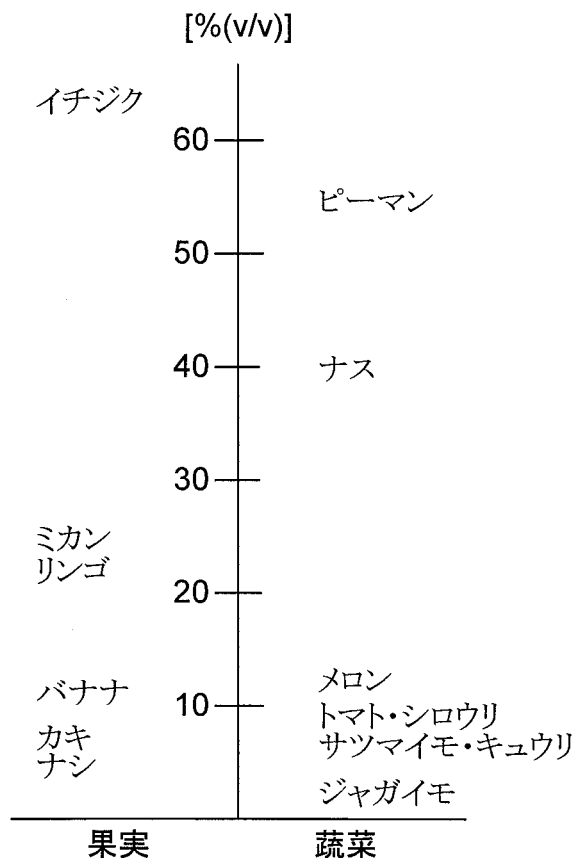
有機化合物	炭水化物	植物体の物質・エネルギー代謝に関与する糖質、細胞壁等を形成するセルロース、ペクチン等。
	たんぱく質	原形質を構成。酵素等。
	脂質	植物体内の貯蔵物質。原形質膜、葉緑体の皮膜、クチクラ等に含まれる。
	核酸	DNA, RNA 等。
無機化合物	水	細胞液の主成分
	ガス	生理作用の結果、細胞内あるいは間隙に取り残された水蒸気、酸素、炭酸ガス、窒素等。
	塩類	ミネラル分が有機物と結合した形で存在。燃焼により灰分として残る。
	酸・塩基	無機酸・塩基性イオンとして細胞液、原形質に存在。

植物生理学大要(田口亮平, 養賢堂, pp.6-19, 1998)を元に整理した。

表 3-3 果菜・根菜類果肉 100g 中の成分組成

食品名	水分 [g]	たんぱく質 [g]	脂質 [g]	炭水化物 [g]	灰分 [g]
西洋かぼちゃ	78.5	1.7	0.2	18.7	0.9
日本かぼちゃ	88.9	1.3	0.1	8.9	0.8
きゅうり	96.2	1	0.2	2	0.6
しろうり	95.5	0.9	0.1	2.9	0.6
たまねぎ	90.4	1	0.1	8.1	0.4
だいこん	94.5	0.8	0.1	4	0.6
なす	94.1	1.1	0.1	4.1	0.6
にがうり	94.5	1	0.1	3.8	0.6
にんじん	90.4	1.2	0.2	7.1	1.1
れんこん	81.2	2.1	0	15.7	1
はつかだいこん	93.9	1.1	0.1	4.3	0.6
はやとうり	93.9	0.6	0.1	5	0.4
トマト	95	0.7	0.1	3.7	0.5
ビート	86.4	2.2	0.1	9.9	1.4
ピーマン	93.5	0.9	0.1	5	0.5
ホースラディッシュ	74.5	3.5	0.3	20.1	1.6
さつまいも	68.2	1.2	0.2	29.4	1
さといも(八つ頭)	77.1	2.1	0.6	19.1	1.1
さといも	83	2.6	0.2	12.8	1.4
ばれいしょ	79.5	2	0.2	17.2	1.1
やまのいも	82.6	2.2	0.4	13.8	1
いちご	90.1	0.9	0.2	8.3	0.5
いちじく	87.7	0.6	0.1	11.1	0.5
いよかん	87.4	0.9	0.1	11.1	0.5
うめ	90.1	0.7	0.5	8.2	0.5
うんしゅうみかん	87.5	0.8	0.1	11.2	0.4
さくらんぼ	84.8	1	0.2	13.5	0.5
かき	83.1	0.4	0.2	15.9	0.4
かりん	84.6	0.3	0.1	14.7	0.3
きんかん	86.7	0.4	0.5	11.9	0.5
ぐみ	86.6	1.3	0.9	10.8	0.4
ざくろ	81.1	0.6	0.2	17.6	0.5
すいか	91	0.7	0	8	0.3
すもも	88.2	0.6	1	9.8	0.4
洋なし	84.1	0.2	0.1	15.2	0.4
中国なし	87.2	0.2	0.1	12.2	0.3
日本なし	88.6	0.3	0.1	10.7	0.3
なつみかん	89.5	0.8	0.3	9	0.4
はっさく	87.5	0.8	0.1	11.2	0.4
びわ	87.7	0.3	0.1	11.5	0.4
ぶどう	84.4	0.5	0.2	14.6	0.3
ぶんたん	88.1	0.7	0.1	10.7	0.4
ぼんかん	88.2	0.9	0.1	10.4	0.4
まくわうり	90.8	0.8	0.1	7.7	0.6
もも	89.3	0.6	0.1	9.6	0.4
りんご	85.8	0.2	0.1	13.6	0.3
アボカド	70.1	2.5	18.7	7.3	1.4
オレンジ(ネーブル)	86.8	0.9	0.1	11.8	0.4
オレンジ(バレンシア)	89.5	0.9	0.1	9.1	0.4
キウイフルーツ	84.1	1	0.4	13.8	0.7
グァバ	86.4	0.7	0.1	12.2	0.6
グレープフルーツ	89.6	0.8	0.1	9.1	0.4
ダンゴール	89.5	0.9	0.1	9.1	0.4
バナナ	75	1.1	0.1	22.9	0.9
パイナップル	83.6	0.4	0.1	15.6	0.3
パッションフルーツ	82.2	0.8	0.4	15.9	0.7
パパイヤ	86.1	0.6	0.2	12.6	0.5
マンゴー	80.8	0.6	0.1	18.1	0.4
メロン	87.2	1	0.1	10.9	0.8
レモン	87.3	0.8	0.6	10.8	0.5

四訂日本食品標準成分表(科学技術庁資源調査会編, 大蔵省印刷局)より抜粋.



樽谷隆之: 果実・野菜の組織内ガス (園芸学研究集録, 9, pp.171, 1979)
より抜粋したものに, 新居のデータ (果実の成長と発育, 朝倉書店,
pp.108, 1979) を追加して作成.

図 3-3 果菜・根菜類の組織内ガス体積分率

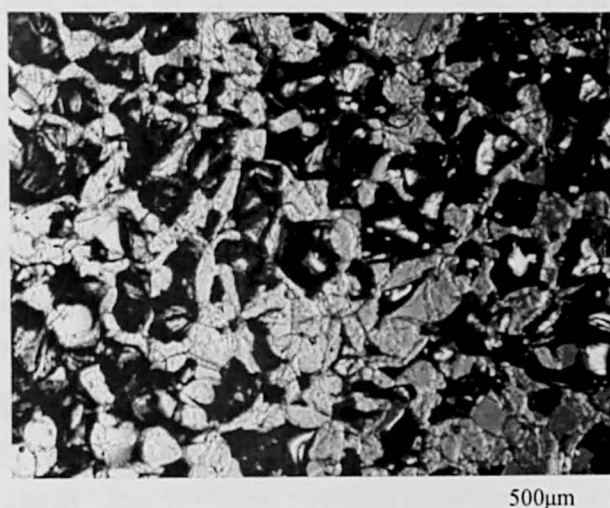
しかし表 3-3 は質量パーセント%(w/w)でまとめたものであるため, 化学組成中, ガス体については除外されてしまう. ガス体の評価は体積分率%(v/v)による必要がある. 図 3-3 に果菜・根菜類の組織内ガスに関する報告例を示す. この図は, ガスが柔組織に占める割合は, 体積分率にして数%から, 多いもので 50%近くにまで及ぶことを示している.

3.2.3. 組織内ガス

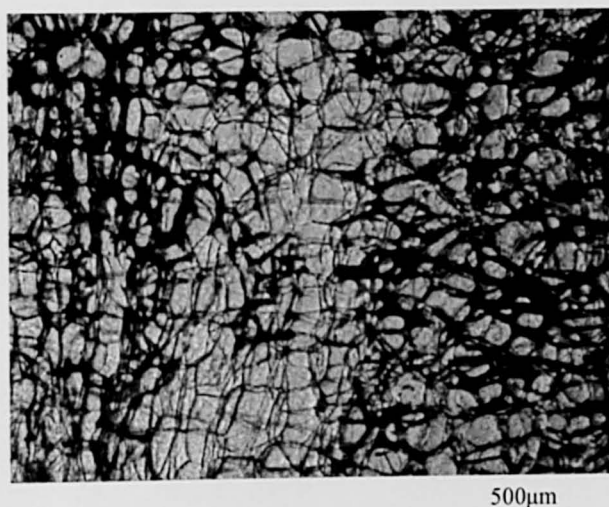
果菜・根菜類柔組織中のいわゆる組織内ガスは, 組織内の空隙中に気相状態で存在している. この空隙は細胞間隙と呼ばれ, その生成には大きく 2 つの過程があると言われている¹⁾. ひとつは, 細胞分裂停止期以後の細胞肥大の過程で, 細胞壁中層 (middle lamella) に集積されたペクチン⁹⁾が可溶化・分解して生成される場合で, このタイプを特に分離細胞間隙 (schizogenous intercellular space) と呼ぶ¹⁾. また果実の生長に伴い一部の細胞膜が溶解して出来るものを崩壊細胞間隙 (lysigenous intercellular space) と呼ぶ¹⁾.

これらの細胞間隙には常にガス体が存在し、植物の生活生理活動、特に呼吸活動を行う際の通気経路として重要な役割を果たしている。例えば、呼吸活動では、雰囲気中の酸素が植物の気孔や皮目などの開孔部を通して組織に入り、細胞間隙を通して細胞内に取り込まれる。そこで生産された二酸化炭素は逆の経路をたどり、系外へ排出される¹⁾。このガス交換は、収穫後も続き、果菜・根菜類の貯蔵中にも行われる。

果実・塊茎・塊根等の大きさを決定する因子は、一般に細胞数と細胞の大きさであるが、リンゴやイチジクのように細胞間隙の体積が数十%(v/v)を越えるようなものにおいては、細胞間隙量も全姿の大きさを決定する要因の一つとして無視することは出来ない。図 3-4 にリン



(a) リンゴ柔組織



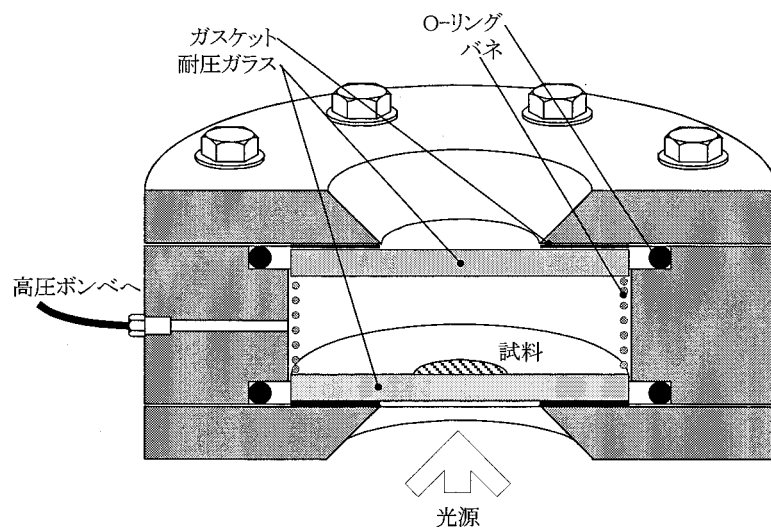
(b) ダイコン柔組織

図 3-4 リンゴ及びダイコン柔組織の実体顕微鏡写真

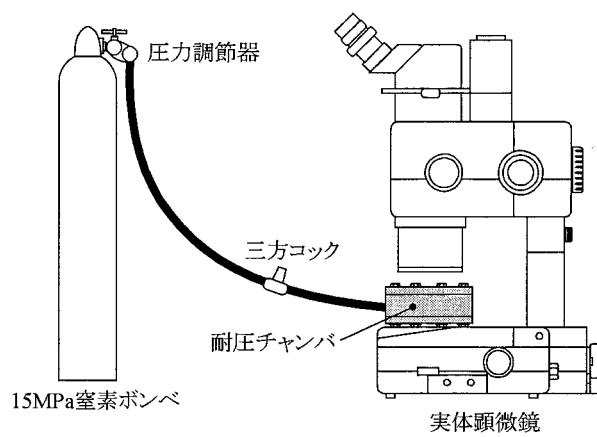
ゴ, ダイコンの光学顕微鏡写真を示す. これは試料下面からの照明による透過画像であるため, 細胞間隙中にガスがある部分では光が散乱し, その結果, 細胞内液で満たされた部分の透過光量と比較して光量が落ち黒く写る. しかし, 細胞壁構造も遮光により同様に黒く写るため, ガスと細胞壁の判別がしにくい. そこで, ガスの圧縮率が柔組織の主成分である水と比較して極めて大きいことを利用して, 試料の雰囲気圧を上げて組織内ガスだけを選択的に圧縮させることでガスの存在の確認を行った. 図 3-5 に試作した高圧下光学顕微鏡観察装置を示す. 装置は実体顕微鏡(オリンパス光学工業製・SZH10), 圧力チャンバ, 及び雰囲気圧制御用の高圧窒素ガス(15MPa)とレギュレータから構成される. 試料をチャンバ下面の耐圧ガラス上に置き, チャンバを密閉して高圧窒素ガスを導入することで, チャンバ内雰囲気圧を最大約 1MPa まで増加させることができる. チャンバ上面のガラスを通してチャンバ内の試料を顕微鏡で観察する.

図 3-6 に圧力を徐々に上げていった組織片の顕微鏡写真を示す. いずれも加圧量が増すにつれて, 黒い部分の面積が減少しており, 組織内ガスが存在する箇所を確認することができる. また黒い部分の消失面積の割合はリンゴが最も多く, 次いでダイコン, ニンジンの順であった. このことは前述の通り, 種類によって細胞間隙量が異なることを表している. また, 貯蔵期間中, 呼吸活動などにより残置される組織内ガス量が増大すると, 細胞間隙量が増大していく可能性がある. また, 細胞間隙が 5%(v/v)以下と比較的少ない塊茎・塊根系のバレイショ, ダイコンでも, 鬆(す)が入ったものでは当然組織内ガス量は多くなっていく.

以上のことから, 細胞間隙および組織内ガスは, 果菜・根菜類の生活生理の上で重要であることはもちろんのこと, その圧縮率が極めて大きなガスが, 種類によっては果菜・根菜類柔組織に占める体積割合が水に次いで大きいこと, また組織内ガス体積分率は品種により数%から 50%近くまでの広範囲に分布することなどが明らかとなった.



(a) 顕微鏡観察用耐圧チャンバ



(b) 顕微鏡システム全体図

図 3-5 高圧下試料観察用顕微システム

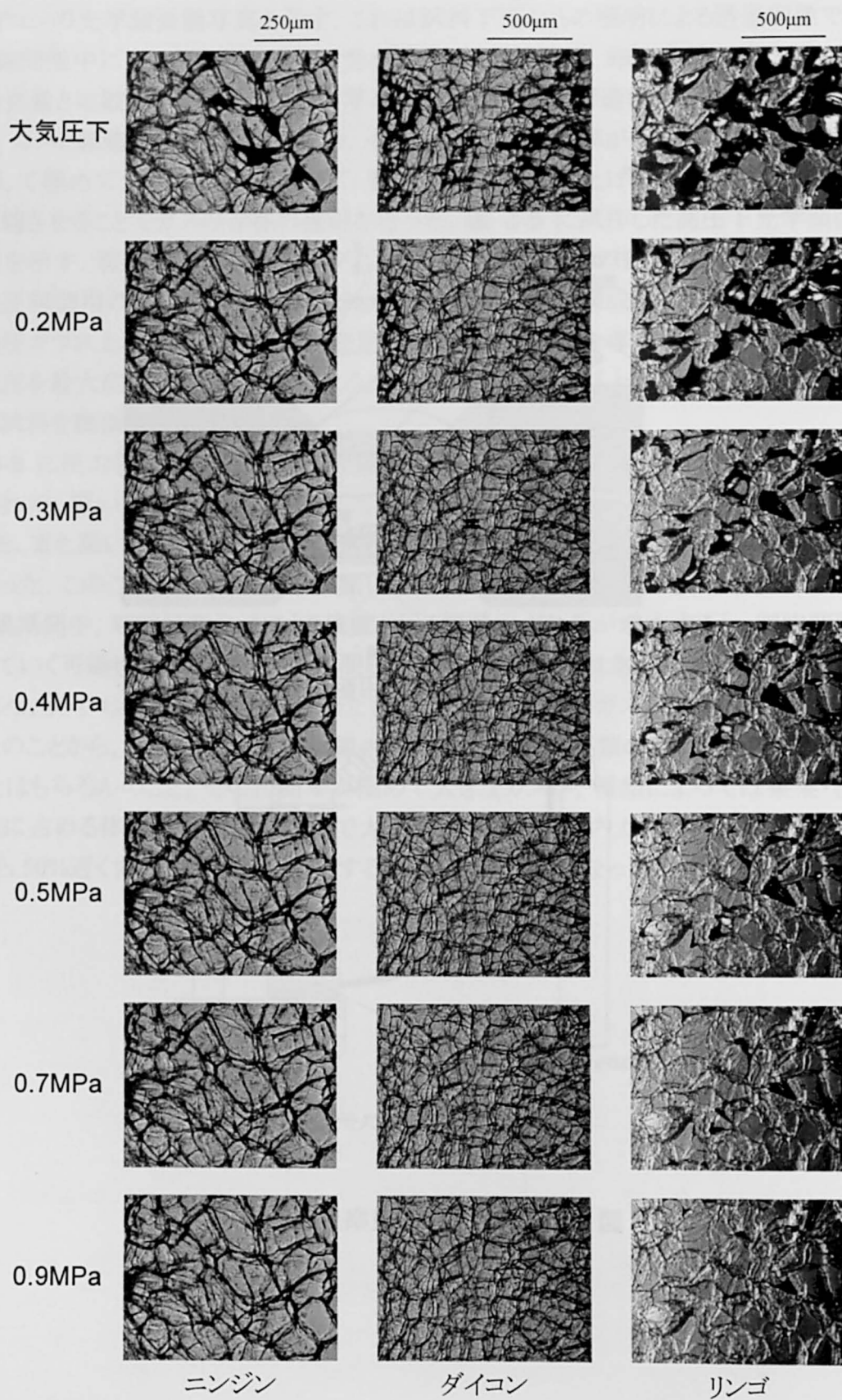


図 3-6 ニンジン・ダイコン・リンゴ柔組織の加圧下顕微鏡写真

第3節 果菜・根菜類の弾性率と音速に及ぼす組織内ガスの影響

果菜・根菜類柔組織の硬さを担っているのは、柔細胞の細胞壁の力学的強度と膨圧であると考えられている¹⁰⁾¹¹⁾。Falkら¹²⁾は、種々の濃度のマニトール液で膨圧をコントロールしたバレイショ塊茎組織のみかけのヤング率を計測し、膨圧とヤング率の間に線形関係があることを見出した。また、Muraseら¹³⁾は、同じくバレイショを用い、細胞液(cell sap)の膨圧と浸透圧の和である水ポテンシャルを計測し、同様の結果を得た。Nilssonら¹⁴⁾は、Falkらの実験結果に基づき、弾性を有する薄膜からなる球殻に非圧縮性の流体が充填された細胞モデルを仮定し、みかけのヤング率と膨圧とのモデル式の結果が実測結果とよく一致することを報告した。しかし、このモデルでは膨圧がほとんどない場合にはヤング率が一律一定になってしまうため、Falkら¹²⁾はこのモデル式にさらに柔組織自体が持つ内部応力により発生する強度を付加することを提案している。これは、ヤング率が定義できない液体が主体である細胞液を除外すれば、細胞形状の不均一性により発生する内部応力により発現する強度であり¹²⁾、さらにそこには細胞壁自体の強度も包含されと考えられる。Gao¹⁵⁾、Pittら¹⁶⁾、そして梅田ら¹¹⁾は、細胞壁自体の弾性率を考慮した細胞モデルを考え、柔組織の力学的特性の把握を試みた。

以上のことから逆に、柔細胞・柔組織の主成分である水の物性自体がみかけのヤング率や剛性率に及ぼすことはほとんどないと考えられる。体積ベースで考えた場合、水、固形成分に次いで大きな割合を占める組織内ガスについても、ヤング率・剛性率が零であるため、柔組織のみかけのヤング率・剛性率には水と同様に、一見ほとんど影響を与えないように考えられる。しかし、矢野¹⁷⁾によれば、食品ゲルの各種弾性率は、ゲル中に分散した気泡の存在割合にも非常に影響を受けるという。すなわち、含まれる気泡が多くなるほど、いわゆるスポンジ状態に近い構造をとるようになり、全体のみかけの弾性率が低下していく。果菜・根菜類柔組織でもナスやリンゴなど組織内ガス分率が30%を超えるものもあり、全体の弾性率の低下をもたらす可能性があることは容易に想像できる。Mohsenin¹⁰⁾も細胞間空隙に関する物性は、柔組織の力学的特性やレオロジ的な特性を解析する上で重要であるとしている。

この節では、組織内ガスの影響を考えるため、細胞主成分である水とガスの物性の比較から全体の物性に与える影響に関する考察を行い、さらに果菜・根菜類柔組織を細胞実質部に組織内ガスが分散した単純なモデルであらわし、弾性率・音速との関係について検討を行う。

3.3.1. ガスと水の物性

果菜・根菜類柔組織の体積・質量ベースで最大の成分である水と、組織内ガスの物性の比較を行う。表 3-4 に、水と空気の基本的な物理特性をまとめたものを示す。両者で物性値が大きく異なっている。力学的特性にかかわるパラメータに注目すると、水・ガスともに流体であり、ヤング率あるいは剛性率は定義できないため、一見、果菜・根菜類柔組織の全体のみかけ硬度には影響を与えないように考えられる。

果菜・根菜類組織が、図 3-7(a)に示すように、柔軟な膜(細胞壁)に囲まれた小さなコンパートメントに水あるいはガスが充填されたものが寄り集まって構成されていると考えれば、数秒の時間スパンで見た場合、水もガスも流体でありながら組織全体を見渡すと流動性がないものとみなすことが可能で、そのような系では流体としての扱いはもはやできなくなる。水はその体積弾性率の大きさから、ほぼ非圧縮性とみなせ、コンパートメントにすべて水が充填されている場合には、系全体に負荷される圧縮・引張力による体積変化はほとんど起こらないため、系全体の歪の大きさは隔壁ネットワークの弾性的特性に依存することになる。一方、すべてのコンパートメントがガス体で充填されている場合は、ガスの圧縮性により体積変動が発生することにより系全体の歪も大きくなり、みかけの弾性率は水に比較して小さくな

表 3-4 水と空気の物性値

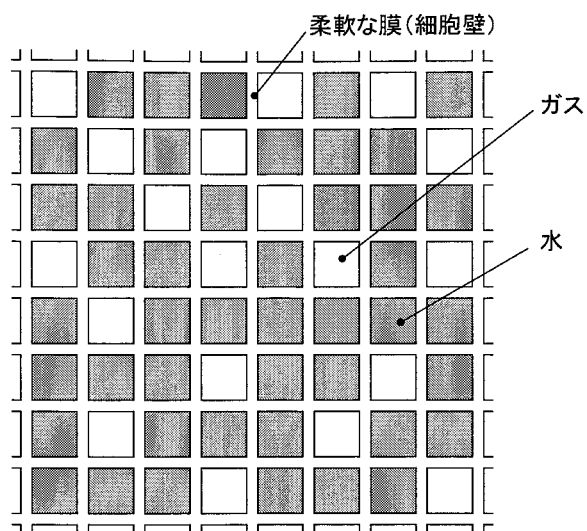
物性値	単位	水	空気	
密度	kg/m ³	997.1	1.184	(25℃)
体積弾性率	MPa	2222	0.142*	(20℃)
粘性率	× 10 ⁻⁶ ・Pa・s	891	18.4	(25℃)
熱伝導率	× 10 ⁻³ ・W/(m・K)	610	25.9	(25℃)
温度伝導率	mm ² /s	0.147	21.7	(25℃)
定圧比熱	kJ/(kg・K)	4.174	1.006	(25℃)
比誘電率	—	80.4**	1.0	(20℃)

* : 空気の値はボアソンの式より算出。

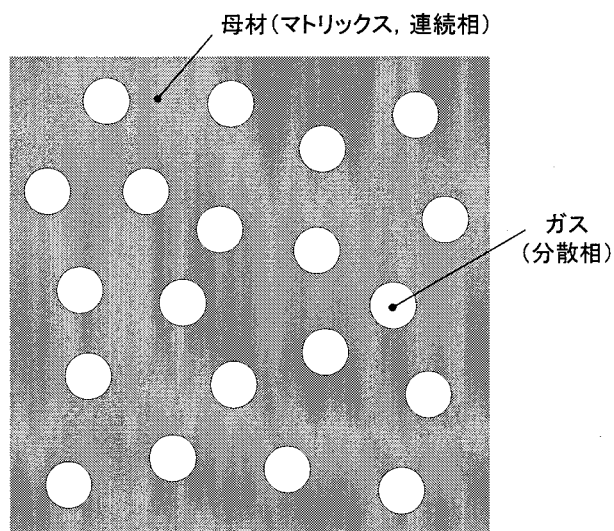
** : 十分に低い周波数時の値。

理科年表(国立天文台 編, 丸善, 1991)及び熱物性ハンドブック(熱物性ハンドブック編集委員会, 養賢堂, 1990)より抜粋・整理。

る。果菜・根菜類組織のように水の充填されたコンパートメントとガスのコンパートメントが混在している系ではガスが入っている分だけ、歪も大きくなるために、弾性率はやはり水のみとの系と比較すると小さくなると考えてよい。矢野らの扱う食品ゲルは図 3-7(a)のようなコンパートメント構造ではなく、同図(b)に示すように寒天ゲルのように弾性を有する柔軟な基質中



(a) コンパートメントモデル



(b) 気泡球分散モデル

図 3-7 柔組織モデル

にガス体が分散しているものであるが、系全体のみかけの弾性率に与えるガス体の影響についてはコンパートメントモデルと同様である。

以上のことが成立するのはあくまでコンパートメント隔壁ネットワークあるいは食品ゲルではその基質部分が非常に柔軟であることが前提であり、仮にそれ自身で自立し、かつ負荷される力にネットワークあるいは基質自身で十分に耐えるだけの強度があれば、コンパートメント内の充填物が流体であれば気相でも液相でもほとんど影響がない¹¹⁾と考えられる。

3.3.2. 気泡分散系理論

3.3.2.1. 気泡分散系モデル

農産物柔組織は前章で述べたように、不均一な形状を持つ細胞の集合体であり、明らかに不均一構造をとる。しかし、果菜・根菜類柔組織全体のみかけの圧縮・引張力—歪応答を考える場合、統計的均一性あるいは巨視的均一性を仮定することができる。

今、果菜・根菜類柔組織を細胞間隙中の組織内ガスと、ガスを除く細胞の集合体(以下、細胞実質と称する)から構成されるものとする。細胞実質部は、柔組織内からガスを取り除いた残りのものを意味する。組織内ガスは図 3-7(b)に示すように、その細胞実質部内に分散していると考える。

このようにある連続相中に分散相が規則的あるいは不規則的に分散した物質系のことを分散系とよぶ²⁾。これまでも、分散系について統計的均一性を仮定し、系の構成物の物質定数と系全体のみかけの物質定数を結びつける試みが数多く行われてきた。Einstein による懸濁液(suspension)の粘性式はその一つの例である。

3.3.2.2. みかけの弾性率

気泡分散系の気泡含有率と各種弾性率との関係は岡野の線形粘弾性体の分散系に関する理論式³⁾を元に矢野らによって既にまとめられている²⁾。

岡野の理論は分散系について以下の仮定を行っている³⁾。

- 1) 媒質および粒子は一樣な等方性線形粘弾性体で、非線形効果はないものとする。
- 2) 粒子は球形とし、その体積分率は充分小であるとする。
- 3) 媒質と粒子の境界面における応力および変位の各成分は連続であるとする。したがって表面張力等の界面現象は考えない。
- 4) 熱伝導、組成成分の拡散等の輸送現象はないものとする。

岡野は、分散粒子間の相互作用を考慮し、self-consistent approximation(それぞれの粒子周辺が分散系全体のみかけの物性値に等しい物性値をもった均一な連続相であるという近似²⁾)を用いて、分散系の複素剛性率として次式を導いた。

$$\frac{G^*}{G_1^*} = \frac{1 + \frac{(G_2^* - G_1^*)(9K_1^* + 8G_1^*)}{6G_2^*(K_1^* + 2G_1^*) + G_1^*(9K_1^* + 8G_1^*)} \phi}{1 - \frac{6(G_2^* - G_1^*)(K_1^* + 2G_1^*)}{6G_2^*(K_1^* + 2G_1^*) + G_1^*(9K_1^* + 8G_1^*)} \phi} \quad (3-1)$$

但し、 G :剛性率[Pa], K :体積弾性率[Pa], ϕ :分散粒子体積分率(0~1), 添字 1:連続相, 添字 2:分散相, 添字*:複素量。

ここでは以下のことが成り立つ³⁾。

- 1) 各複素弾性率を正、実の定数とすれば、非散逸系つまり完全弾性体、完全流体の場合

合となる.

- 2) $K_2^* = 0, G_2^* = 0$ とすれば連続相中に空孔が存在する場合になる.
- 3) $K_2^* \rightarrow \infty, G_2^* \rightarrow \infty$ とすれば剛体球の分散系になる.
- 4) $K_1^* \rightarrow \infty$ または $K_2^* \rightarrow \infty$ とすれば, それぞれ連続相または分散相が非圧縮性の場合になる.
- 5) $G_1^* = i\omega\eta_1$ または $G_2^* = i\omega\eta_2$, ただし η_1 または η_2 は正, 実の定数とおけば, それぞれ連続相, 分散相が粘性流体の場合になる.

気泡分散系は上記の 2) に相当するため, (3-1) 式にこの条件を適用すると次式を得る.

$$G^* = \frac{9K_1^* + 8G_1^* - (9K_1^* + 8G_1^*)\phi}{9K_1^* + 8G_1^* + 6(K_1^* + 2G_1^*)\phi} \cdot G_1^* \quad (3-2)$$

(3-2) 式は, 気泡分散系のみかけの複素剛性率 G^* が連続相の複素弾性率 K_1^* , G_1^* , 及びガス体積分率 ϕ のみで表されることを示している. また連続相の弾性率が一定であれば, 剛性率はガス体積分率のみの関数になる.

剛性率以外の弾性率についても考えてみる. 山田は, 等方均一媒体に時間 $t = 0$ で一定歪を与えた場合 (応力緩和) の粘弾性定数間の関係式を次のように導いた²⁾¹⁸⁾.

$$E^*(t) = 2\{1 + \nu^*(0)\}G^*(t) + 2 \int_{0^+}^t G^*(t-\tau) \frac{d\nu^*(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (3-3)$$

$$E^*(t) = 3\{1 - 2\nu^*(0)\}K^*(t) - 6 \int_{0^+}^t K^*(t-\tau) \frac{d\nu^*(\tau)}{d\tau} d\tau \quad (3-4)$$

但し, t, τ : 時間, ν^* : 複素ポアソン比, 右辺積分項 $0^+ : \tau = 0$ におけるステップ応答を含めない.

物体が完全弾性体 (複素弾性率の虚部が零, $\nu \neq 0.5$), 応力と歪の関係が $t > 0$ で一定であれば, (3-3), (3-4) 式右辺の積分が零となり, 両式より次式を得る.

$$E = 2(1 + \nu)G = 3(1 - 2\nu)K \quad (3-5)$$

粘弾性体であっても瞬間歪に対しては (3-5) 式が成立する²⁾. また振動・音響の伝播現象を考える場合, 媒質内でおきる振動のサイクルは粘弾性体の緩和時間より十分小さく, 振動変位も極めて小さいとみなせる. 従って, 瞬間歪のみを考え, (3-5) 式を用いることとする. また以降, 複素弾性率の虚数が零である場合については, 記号中の $*$ を付記しないものとする.

(3-5) 式から連続相について次式が成立する.

$$G_1 = \frac{3(1 - 2\nu_1)}{2(1 + \nu_1)} K_1 \quad (3-6)$$

(3-6) 式を (3-2) 式に代入すると,

$$G = \frac{(7-5\nu_1)(1-\phi)}{(7-5\nu_1)+(8-10\nu_1)\phi} \cdot \frac{3(1-2\nu_1)}{2(1+\nu_1)} K_1 \quad (3-7)$$

を得る。これは気泡分散系のみかけの剛性率 G を、(3-2)式で用いた体積弾性率の代わりに連続相のポアソン比 ν_1 を用いて表すことができることを示している。つまり、(3-5)式が成立することで、4つの弾性率、 K 、 E 、 G 、 ν のうち、独立な2つの弾性率を与えられると残る2つの弾性率が決定できる。そこで、みかけの剛性率 G 以外に、さらにもうひとつ弾性率を(3-2)式あるいは(3-7)式のように連続相の弾性率とガス体積分率で表すことができれば、残る弾性率をすべて決定することが理論上可能になる。

矢野²⁾によれば、Mackenzie¹⁹⁾が弾性体中に球孔が分散した系の体積弾性率について次式を導いているという。

$$K = K_1 \frac{1-\phi}{1 + \frac{3}{4} \frac{K_1}{G_1} \phi} \quad (3-8)$$

これは、(3-6)式より、(3-8)式の剛性率 G_1 の代わりにポアソン比 ν_1 を用いて次式のように表される。

$$K = \frac{2(1-2\nu_1) - 2(1-2\nu_1)\phi}{2(1-2\nu_1) + (1+\nu_1)\phi} K_1 \quad (3-9)$$

(3-7)式と(3-9)式を(3-5)式に代入・整理すると次式を得る。

$$\sigma = \frac{2(1+\nu_1)\{7-5\nu_1 + (8-10\nu_1)\phi\} - (7-5\nu_1)\{2-4\nu_1 + (1+\nu_1)\phi\}}{4(1+\nu_1)\{7-5\nu_1 + (8-10\nu_1)\phi\} + (7-5\nu_1)\{2-4\nu_1 + (1+\nu_1)\phi\}} \quad (3-10)$$

また(3-9)式と(3-10)式を(3-5)式に代入・整理すると次式を得る。

$$E = \frac{18(1-2\nu_1)(7-5\nu_1)(1-\phi)}{4(1+\nu_1)\{(7-5\nu_1) + (8-10\nu_1)\phi\} + (7-5\nu_1)\{2-4\nu_1 + (1+\nu_1)\phi\}} K_1 \quad (3-11)$$

以上、(3-7)式、(3-9)式、(3-10)式、(3-11)式より、それぞれみかけの剛性率 G 、体積弾性率 K 、ポアソン比 ν 、ヤング率 E を、連続相の体積弾性率 K_1 とポアソン比 ν_1 、及び分散相である気泡の体積分率 ϕ で表すことができる。

果菜・根菜類柔組織の各種弾性率が組織内ガスにどのような影響を受けるか、以上の式を用いて計算を行う。連続相の物性が必要になってくるが、柔組織を考えた場合、細胞実質部が連続相にあたる。その主成分である水が細胞実質部の80%以上を占めるため、連続相の物性は水に近いものと推察される。体積弾性率は、その定義より、雰囲気気圧の変動に対する体積変動量を元に計算できるが、体積の変動の主体である水の割合が体積・質量ベースでみてともに80~90%近くを占めるために、果菜・根菜類の種類を問わず細胞実質部の体積弾性率は水の体積弾性率である2.22GPaに近い値をとると考えられる。また、ポアソン比も主成分の水が非圧縮性に近い(完全な非圧縮性は体積弾性率が無限大でない限りあり得ない)ために、0.5に極めて近い値をとると考えられる。ここで注意すべきは、細胞実質部のこれら体積弾性率とポアソン比が水のそれに近いが、水のような流体ではないということである。

ある。流体であれば、ヤング率、剛性率、ポアソン比がそもそも定義できない。これらは水のあくまで体積変化に着目した近似であり、このことは水であるということを示すものではない。ヤング率、剛性率は果菜・根菜類の種類や個体によって異なるが、それはポアソン比・体積弾性率に当然反映されてくるものである。しかし、その変動量は相対的にみて大きな変動をもたらすものではない。

(3-5)式は細胞実質部にも成り立つため、次式が成立する。

$$E_1 = 2(1 + \nu_1)G_1 = 3(1 - 2\nu_1)K_1 \quad (3-12)$$

簡単のために体積弾性率 K_1 を固定してポアソン比を変化させた場合のヤング率 E_1 について(3-12)式を元に計算した結果を図 3-8 に示す。ポアソン比が 0.4900 から 0.4999 まで約 2%増加すると、ヤング率は 100 分の 1 に減少する。一方、0.300 から 0.306 までやはり約 2%増加させた場合にはヤング率は約 3%の減少に過ぎない。ポアソン比が 0.5 に近い場合は、ヤング率あるいは剛性率の大きさに個体差があってもポアソン比の変化は数%以下の微小な差にしか現れてこないと言える。

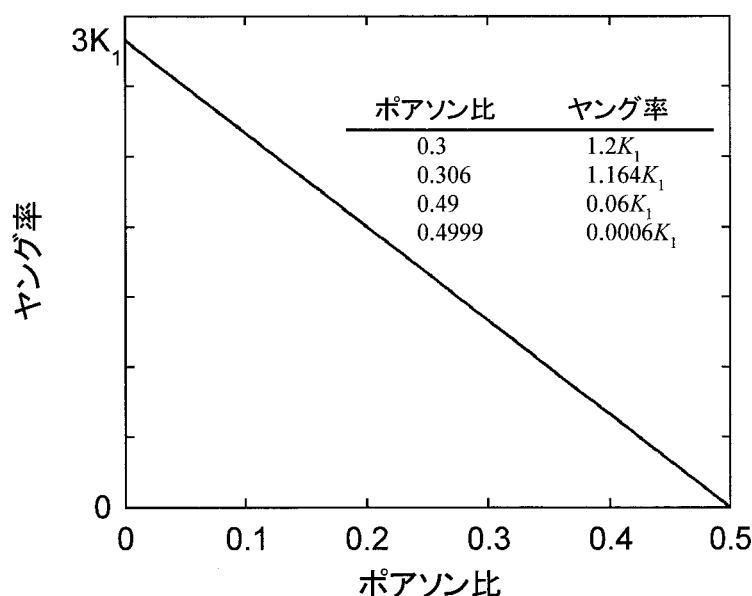


図 3-8 細胞実質部のヤング率とポアソン比の関係

便宜的に細胞実質部の体積弾性率 K_1 を水の体積弾性率 2.22GPa に、ポアソン比 ν_1 に 0.499 を与えて上記理論式を用いて計算し、気泡が及ぼす影響について検討する。図 3-9 に気泡分散系のみかけの体積弾性率 K とガス体積分率 ϕ の関係を示す。ガス体積分率が零のとき、連続相の体積弾性率を示し、気泡を含むにしたがって大きく減少している。約 2.3%(v/v)までで体積分率が 10 分の 1 に、約 20%(v/v)で 100 分の 1 になっている。

図 3-10 にみかけのヤング率 E 、剛性率 G とガス体積分率 ϕ の関係を示す。ガス体積分率が零の部分ではヤング率が剛性率の 2.998 倍になっており、いわゆる 3 倍則 ($E \cong 3G$) が成立している。体積弾性率同様に、気泡を含む割合が多くなるほど、ヤング率・剛性率ともに減少する傾向であったが、減少率はいずれも体積弾性率ほど大きくない。例えば、ガス体積分率が 20%(v/v)でヤング率は約 32%ほど、剛性率は約 29%の減少であるが、体積弾性率の減少率(99%)よりも小さい。弾性率の大きさを比較するために図 3-9 と図 3-10 を同一グラフにプロットした結果を図 3-11(a)に示す。体積弾性率がヤング率・剛性率よりも大きく、特にガス体積分率が小さいほどその差は大きい。体積弾性率とヤング率の比をプロットした結果を図 3-11(b)に示す。ガス体積分率が零の場合には体積弾性率はヤング率の約 166 倍の大きさがあるが、ガス体積分率が増すにつれてその差は縮まり、20%(v/v)で約 2.5 倍ほどの大きさとなる。

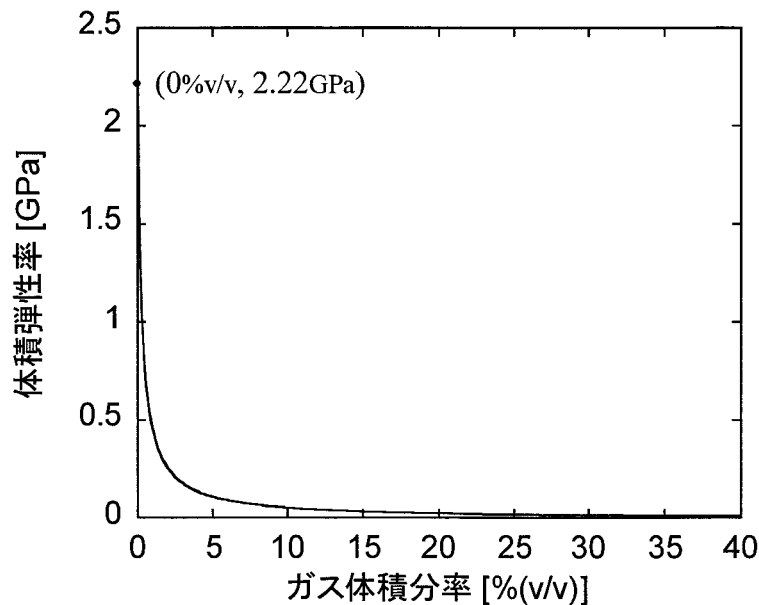


図 3-9 気泡分散系のみかけの体積弾性率 K とガス体積分率 ϕ の関係

$$\text{実線: } K = \frac{2(1 - 2\nu_1) - 2(1 - 2\nu_1)\phi}{2(1 - 2\nu_1) + (1 + \nu_1)\phi} K_1 \quad (K_1 = 2.22\text{GPa}, \nu_1 = 0.499 \text{ で計算.})$$

K : 体積弾性率 [Pa]

ν : ポアソン比 [—]

“1”: 連続相の

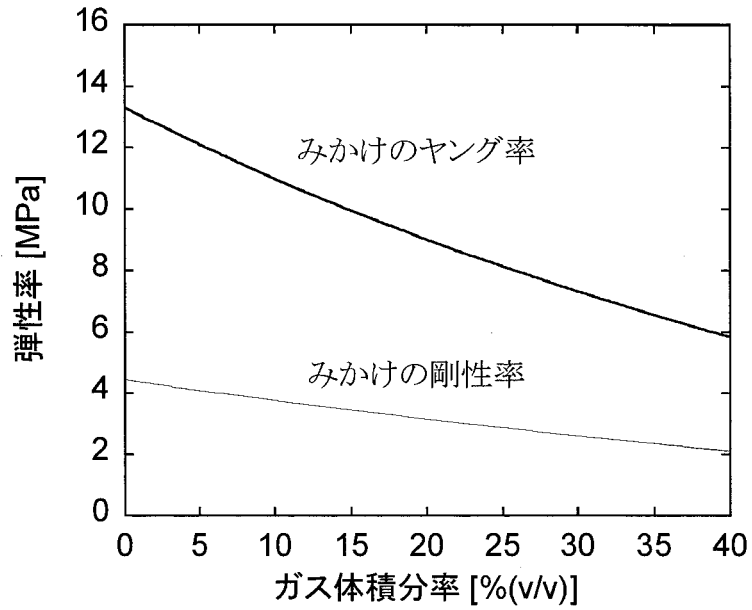


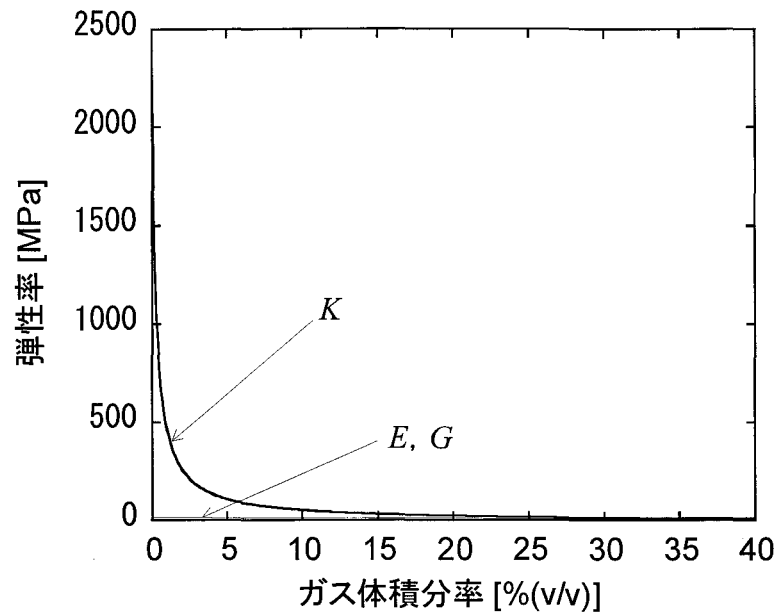
図 3-10 気泡分散系のみかけのヤング率 E ・剛性率 G とガス体積分率 ϕ の関係

みかけのヤング率:
$$E = \frac{18(1-2\nu_1)(7-5\nu_1)(1-\phi)}{4(1+\nu_1)\{(7-5\nu_1)+(8-10\nu_1)\phi\} + (7-5\nu_1)\{2-4\nu_1+(1+\nu_1)\phi\}} K_1$$

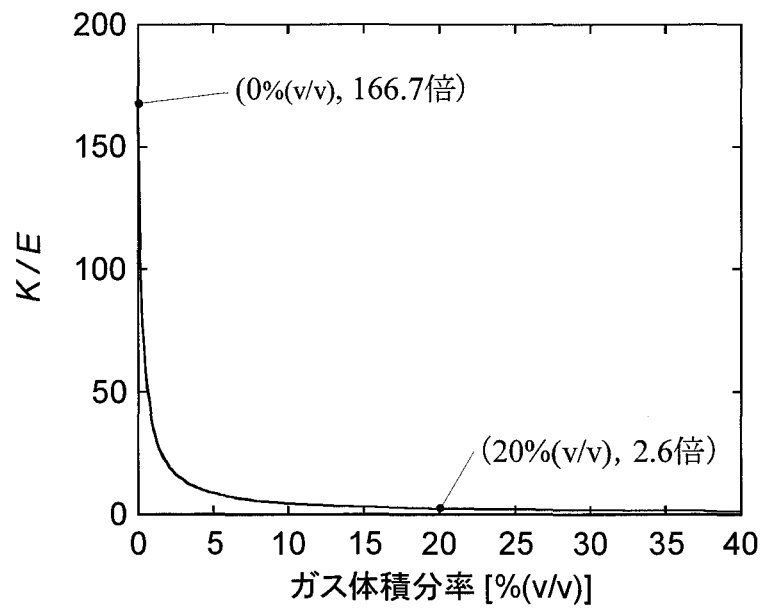
みかけの剛性率:
$$G = \frac{(7-5\nu_1)(1-\phi)}{(7-5\nu_1)+(8-10\nu_1)\phi} \cdot \frac{3(1-2\nu_1)}{2(1+\nu_1)} K_1$$

K : 体積弾性率 [Pa] ν : ポアソン比 [—] “1”: 連続相の

2 式とも $K_1 = 2.22\text{GPa}$, $\nu_1 = 0.499$ で計算.



(a) みかけの弾性率とガス体積分率の関係



(b) 体積弾性率とヤング率の比 (K/E) とガス体積分率の関係

図 3-11 気泡分散系のみかけの弾性率とガス体積分率の関係

K : みかけの体積弾性率

E : みかけのヤング率

G : みかけの剛性率

$K_1 = 2.22 \text{ GPa}$, $\nu_1 = 0.499$ で計算した結果.

図 3-12 にみかけのポアソン比 ν とガス体積分率 ϕ の関係を示す。この場合も、ガス体積分率が増加するにつれてポアソン比が減少している。減少率については、ガス体積分率が20%(v/v)で約13%となり、体積弾性率ほどの急激な変化はみられない。

次に連続相のポアソン比を0.499から0.490に変えた場合の各種みかけの弾性率とガス体積分率との関係を図 3-13 に示す。ガス体積分率が零の場合を基準に体積弾性率が10分の1になるガス体積分率は約19%(v/v)となり、体積弾性率の変化は、ポアソン比が0.499の場合と比較して緩やかになっている。ヤング率・剛性率については、どちらもガス体積分率によらず約10倍になっている。ポアソン比は全体に1~2%ほどの減少に過ぎない。前述したように連続相のポアソン比が0.5に近い場合には、他の弾性率が大きく変化してもポアソン比の変動はそれに比較して小さいことが要因であると考えられる。従って、図 3-12 に示すみかけのポアソン比とガス体積分率の関係は、ヤング率や剛性率が表すいわゆる「硬さ」にあまり影響されない、つまり種類・個体を問わずおおよそ成立するものと考えられる。図 3-14 は、表 2-9 と図 3-3 のデータを用いて、リンゴ、サツマイモ、バレイショ、トマトについてポアソン比を組織内ガスの大きさ順に並べて整理したものであるが、組織内ガスが多くなるほどポアソン比が下がる傾向がみられ、これは図 3-12 の結果と一致している。

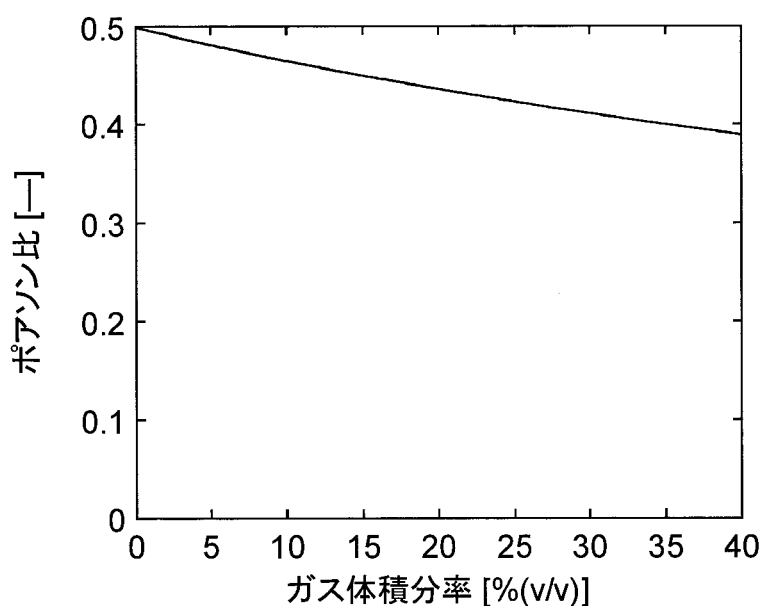
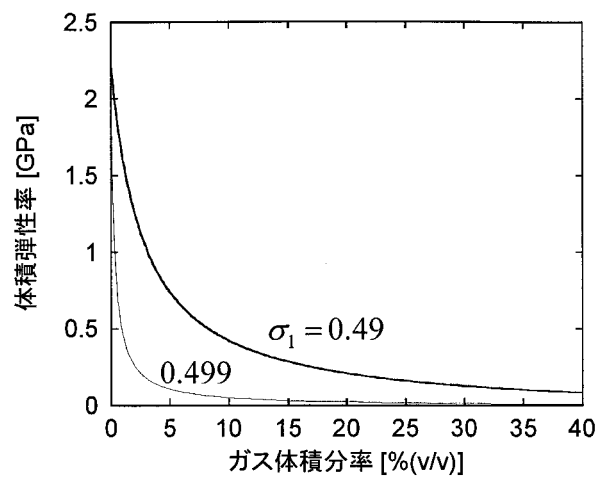
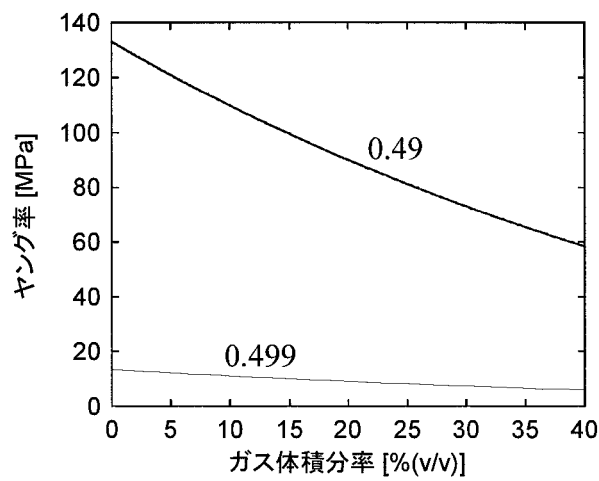


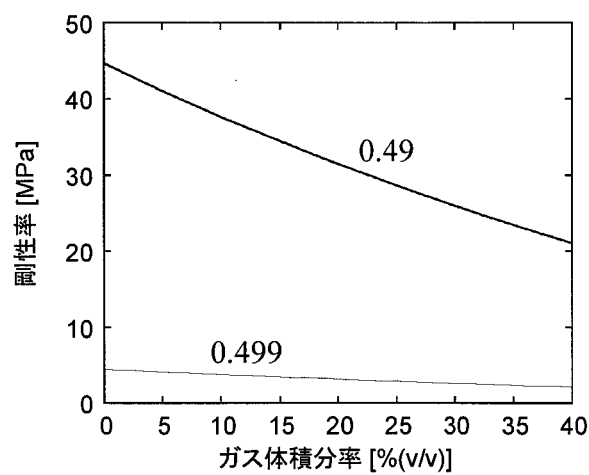
図 3-12 気泡分散系のみかけのポアソン比 ν とガス体積分率 ϕ の関係



(a) みかけの体積弾性率の場合

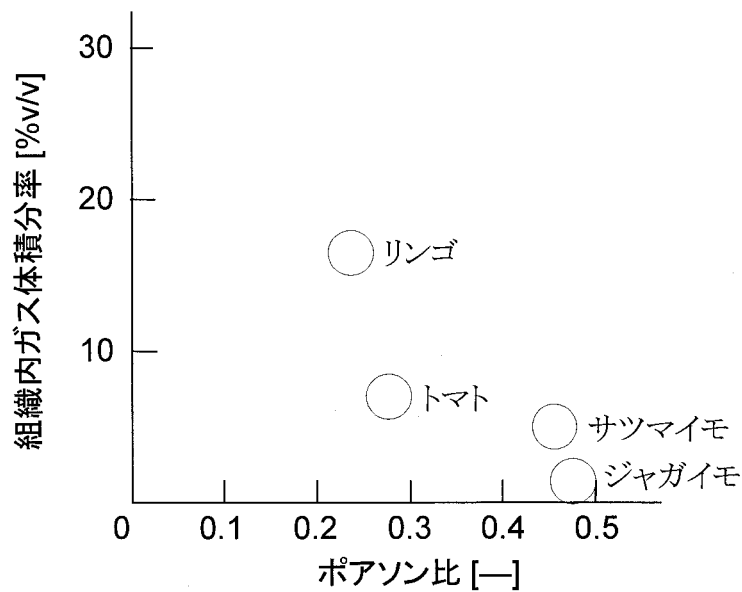


(b) みかけのヤング率の場合



(c) みかけの剛性率の場合

図 3-13 連続相のポアソン比がみかけの弾性率—ガス体積分率関係に与える影響



組織内ガス体積分率には、樽谷隆之：果実・野菜の組織内ガス（園芸学研究集録，9，pp.171，1979）より抜粋したものに、新居のデータ（果実の成長と発育，朝倉書店，pp.108，1979）を追加したデータを，ポアソン比は食品の物性（N.N.モーゼセン，光琳，pp.669，1982），農産物性研究-第2集-（農業機械学会編，pp.64-65，1985），農産物性研究-第3集-（農業機械学会編，pp.69，1991）のデータを参考に作成した。

図 3-14 果菜・根菜類の組織内ガス体積分率とポアソン比

3.3.2.3. 無限媒体中の振動伝播速度

無限媒体中の振動伝播速度は前章で述べたように縦波音速と考えて，(2-42)式を用いる．密度については，加成性（物性量が構成成分各々に固有の物性量の和で表される性質）から次式が成立する．

$$\rho = (1 - \phi)\rho_1 \quad (3-13)$$

但し， ρ ：密度[kg/m³].

(2-42)式に(3-7)式，(3-9)式，(3-13)式を代入・整理すると次式を得る．

$$c_l = \sqrt{\frac{K_1}{\rho_1} \left[\frac{2(1-2\nu_1)}{2(1-2\nu_1) + (1+\nu_1)\phi} + \frac{2(7-5\nu_1)(1-2\nu_1)}{\{(7-5\nu_1) + 2(4-5\nu_1)\phi\}(1+\nu_1)} \right]} \quad (3-14)$$

但し， c_l ：無限媒体中の縦波音速[m/s].

前節と同様に，上式の体積弾性率 K_1 に 2.22GPa を，ポアソン比 σ_1 に 0.499 を与え，そして密度 ρ_1 には水の値 1000kg/m³ を与えて縦波音速を計算した結果を図 3-15 に示す．気泡の体積分率が零のときの計算値は，1491.53m/s となる．これは水の縦波音速の文献値が 1483m/s (20℃時)²⁰⁾ とほぼ一致する．連続相の主成分である水の物性値を連続相の物性と

して与えているために、当然の結果であると言える。気泡を含むにつれて縦波音速は大きく減少し、約 20%(v/v)で初期値の 88%近くも減少している。従って、縦波音速はガス体積分率の影響を非常に強く受けると言える。(2-42)式からガス体積分率の影響を受けるパラメータは密度 ρ 、体積弾性率 K 、剛性率 G である。ガス体積分率 20%(v/v)間での変化率で考えると、密度 ρ は 20%、体積弾性率 K は 99%、剛性率 G は 29%減であり、体積弾性率の減少率が際立って大きい。また絶対値を比較すると、体積弾性率が最大となる。(2-42)式中、体積弾性率と剛性率の和の項において、最も大きいパラメータの減少率が最も大きいために、縦波音速の変化は体積弾性率の変化によるところが大きいと言える。縦波音速が図 3-9と同様な傾向を示すのはそのためである。ガス体積分率が 2%(v/v)の場合、体積弾性率の絶対値は、剛性率の約 60 倍であり、縦波音速は体積弾性率支配に近いといえる。しかし、ガス体積分率がさらに増すと、体積弾性率と剛性率の差が縮まり、20%(v/v)では、体積弾性率が剛性率の約 7.5 倍になる。従って、縦波音速の体積弾性率への寄与の割合は、気泡が増すにつれて減少していく。

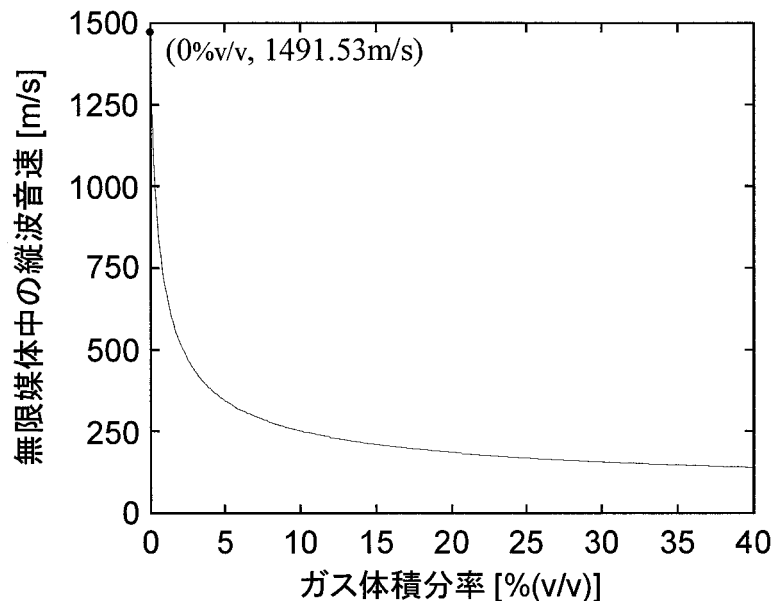


図 3-15 気泡分散系の縦波音速とガス体積分率の関係

$$\text{実線: } c_l = \sqrt{\frac{K_1}{\rho_1} \left[\frac{2(1-2\nu_1)}{2(1-2\nu_1) + (1+\nu_1)\phi} + \frac{2(7-5\nu_1)(1-2\nu_1)}{\{(7-5\nu_1) + 2(4-5\nu_1)\phi\}(1+\nu_1)} \right]}$$

K : 体積弾性率 [Pa] ν : ポアソン比 [—] ρ : 密度 [kg/m³] “1”: 連続相の

$K_1 = 2.22\text{GPa}$, $\nu_1 = 0.499$, $\rho_1 = 1000\text{kg/m}^3$ で計算.

3.3.2.4. 有限媒体中の振動伝播速度

前章で述べたように、有限媒体中の振動伝播速度は、(2-77)式に示すように、ヤング率あるいは剛性率を密度で除したものの平方根に比例すると考えられる。そこでヤング率を用い、便宜的に次式を用いることとする。

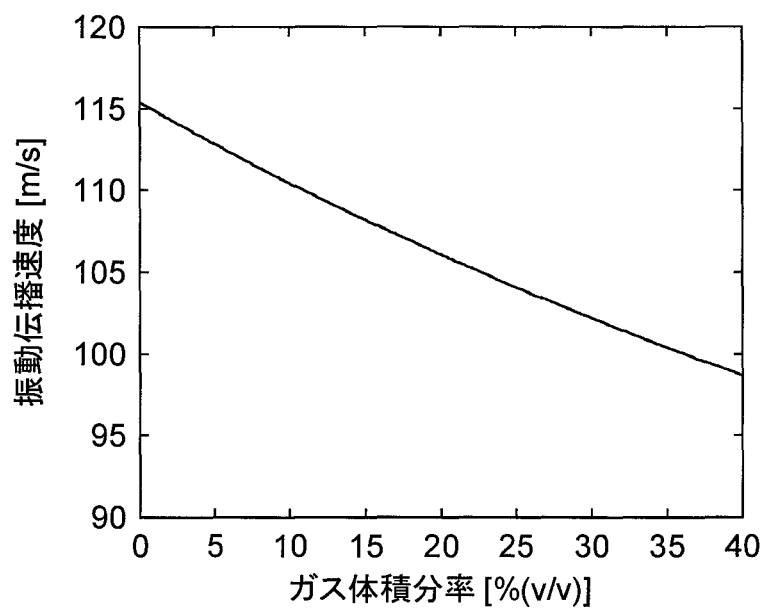
$$c_f = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3-15)$$

因みにこの式は細い棒内の縦振動速度の式と同形である。

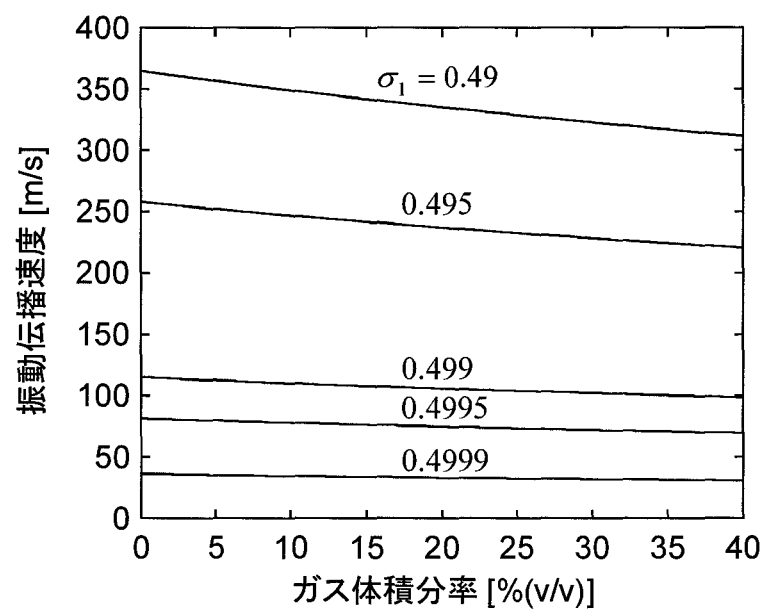
(3-15)式に(3-11)式を代入・整理すると次式を得る。

$$c_f = \sqrt{\frac{K_1}{\rho_1} \frac{18(1-2\nu_1)(7-5\nu_1)}{4(1+\nu_1)\{(7-5\nu_1)+(8-10\nu_1)\phi\} + (7-5\nu_1)\{2-4\nu_1+(1+\nu_1)\phi\}}} \quad (3-16)$$

これまでと同様に、体積弾性率 K_1 に 2.22GPa を、ポアソン比 ν_1 に 0.499 を、密度 ρ_1 に 1000kg/m³ を与えて音速を計算した結果を図 3-16(a)に示す。ガス体積分率が増加するにつれて減少する傾向にあるが、その減少率は縦波音速と比較すると小さく、20%(v/v)で約 8%の減少である。連続相のポアソン比の大きさ別に音速とガス体積分率の関係をプロットしたグラフを図 3-16(b)に示す。これより、連続相のポアソン比によって音速値が全体的に増減するものの、ポアソン比が同一であれば、音速は減少傾向を示し、その減少率もいずれも 20%(v/v)で約 8%の減少であり、ポアソン比の違いはほとんど影響を与えていない。図 3-17 に縦波音速もあわせてプロットした結果を示す。気泡が入ると縦波音速は急減するのに対して、(3-16)式の音速の減少は非常に緩やかであることが示されている。



(a) 連続相のポアソン比が0.499の場合



(b) 連続相のポアソン比別の伝播速度—ガス体積分率関係

図 3-16 有限媒体中の振動伝播速度とガス体積分率の関係

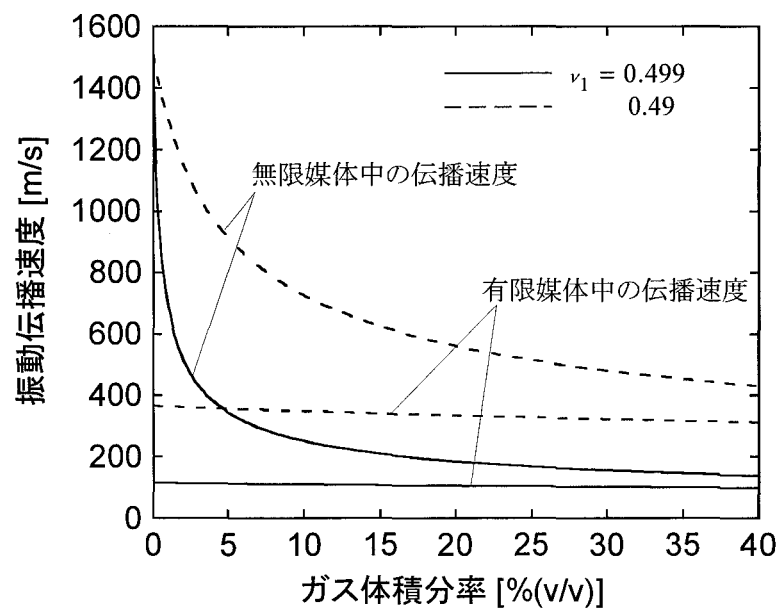


図 3-17 無限・有限媒体近似の振動伝播速度に与えるガス体積分率の影響

参考文献

- 1) 樽谷隆之：果実・そ菜の組織内ガス，園芸学研究集録，第9集，pp.170-176 (1979)
- 2) 矢野俊正，松本幸雄，林 弘通，加藤正敏：食品工学基礎講座 9，乳化と分散，光琳，pp.105-114 (1988)
- 3) 岡野光治：分散系の見掛の粘弾性定数，応用物理，36(12)，pp.1003-1007 (1967)
- 4) 田口亮平：植物生理学大要—基礎と応用—，養賢堂，pp.27-48 (1998)
- 5) 新居直祐：果実の成長と発育，朝倉書店，pp.117-123 (1998)
- 6) 苫名 孝：果実の生理，養賢堂，pp.132-138 (1998)
- 7) 桜井直樹・山本良一・加藤陽治：植物細胞壁と多糖類，培風館，pp.61 (1991)
- 8) 増田芳雄：植物の生理，岩波書店，pp.63-64 (1986)
- 9) 田口亮平：植物生理学大要—基礎と応用—，養賢堂，pp.35-36 (1998)
- 10) Mohsenin, N. N. 著，林 弘通 監・訳：食品の物性，光琳，pp.19-28 (1982)
- 11) 梅田幹雄，並河 清，長坂善禎，本村知睦，中原高伸：十四面体模型細胞の力学特性(第1報)—模型細胞体の圧縮反力解析—，農業機械学会誌，59(2)，pp.52-62 (1997)
- 12) Falk, S., Hertz, C. H. and H. I. Virgin : On the relation between turgor pressure and tissue rigidity. I - experiments on resonance frequency and tissue rigidity -, *Physiologia Plantarum*, 11, pp.802-817 (1958)
- 13) Murase, H., Merva, G. E. and L. J. Segerlind : Variation of Young's modulus of potato as a function of water potential, *Transactions of the ASAE*, 23(3), pp.794-796, pp.800 (1980)
- 14) Nilsson, S. B., Hertz, C. H. and S. Falk : On the relation between turgor pressure and tissue rigidity. II - theoretical calculations on model systems -, *Physiologia Plantarum*, 11, pp.818-837 (1958)
- 15) Gao, Q. and R. E. Pitt : Mechanics of parenchyma tissue based on cell orientation and microstructure, *Transactions of the ASAE*, 34(1), pp.232-238 (1991)
- 16) Pitt, R. E. and D. C. Davis : Finite element analysis of fluid-filled cell response to external loading, *Transactions of the ASAE*, 27(6), pp.1976-1983 (1984)
- 17) 矢野俊正：食品工学の現状と将来，日本機械学会誌，92(846)，pp.408-413 (1989)
- 18) 山田嘉昭：塑性・粘弾性，培風館，pp.232-233 (1980)
- 19) Mackenzie, J. K. : *Proceedings of the physical society*, 63B, 2 (1950)(文献2)参照。)
- 20) 実吉純一，菊池喜充，能本乙彦：超音波技術便覧，日刊工業新聞社，pp.1329 (1991)

第4章 縦波超音波振動実験

第1節 はじめに

前章では果菜・根菜類柔組織の振動伝播を考える場合に、連続相にガス小粒子が分散した 2 相系モデルを仮定し、分散系理論により、ガス体積分率が各種弾性率、振動伝播速度に及ぼす影響について理論的な検討を行った。この理論はガスが及ぼす影響を非常に単純化した理論であるため、弾性率、振動伝播速度に与える影響を予測するのが容易であり、おおまかな傾向をつかむのに非常に都合がよい。そこで本章ではこの理論から予測される傾向について、実測データを用いた比較検討を行う。その際、他のパラメータを変化させずにガス体積分率のみを変化させることが出来れば、内在ガスの及ぼす影響を検討する上で都合がいい。果菜・根菜類柔組織を構成する物質の中で、組織内ガスのみが顕著な圧縮性を示すことを利用して、試料雰囲気気圧を高めて、組織内ガスを圧縮あるいは細胞液中に溶解させれば、ガス体積分率を自由に変化させることが出来る。果実・野菜の種類によりガス体積分率の大きさは異なり、またその分布もある程度の範囲に限られる。加圧計測は同一試料のガス体積分率を人為的に変化させることができるため、因果関係を推測するためには有効な手段であると考えられる。以上のことを勘案して、本研究では大気圧下の計測以外に加圧下での計測も行うことにした。

本章では、まず理想の 2 相モデルに近い試料として気泡分散寒天ゲルを用い、そのガス体積分率、みかけのヤング率、超音波縦波音速を計測し、理論予測との比較検討を行った結果を示す。次に試料を果菜・根菜類柔組織より切り出したものに代えて、同様の計測を行い検討した結果を示し、最後に組織内ガスが無限媒体中の縦波音速に与える影響についてまとめる。

第2節 気泡分散寒天ゲルを用いた実験

4.2.1. 実験方法

4.2.1.1. 実験試料

気泡分散モデルは図 4-1 に示すように、物性が均一な連続相の中に、小さな粒子状のガスが分散したものである。ここではこのモデルに近い試料として、果菜・根菜類柔組織と同様に水を主成分に持つ寒天ゲルの中に、気泡を分散させたものを用いることにした。

気泡分散寒天ゲルは、沸騰水に寒天末を溶解させた寒天原液を冷却しながらマグネティックスターラーで攪拌して調製するのが一般的である¹⁾。しかしこの方法では、気泡含有量の制御が困難であるため、代わりにアクリロニトリル製の中空カプセル球(松本油脂製マイクロカプセル:F-80ED, 粒径分布:50~100 μm , 平均粒径:80 μm , 殻厚:0.2 μm , 殻比重:1.06)を用いた。これは、カプセル殻(シェル)の厚さが径の 0.4%以下であるため、カプセル体積はすなわちガスの体積とみなすことができ、気泡含有量の調節が容易である。またガス粒子の粒度分布がそろった試料を作製することができる利点もある。

このように殻厚は無視できるものの、高分子膜の力学的な特性については考慮しておく必要がある。このマイクロカプセルは、粒径 16~32 μm の中空球にイソブタン(沸点:

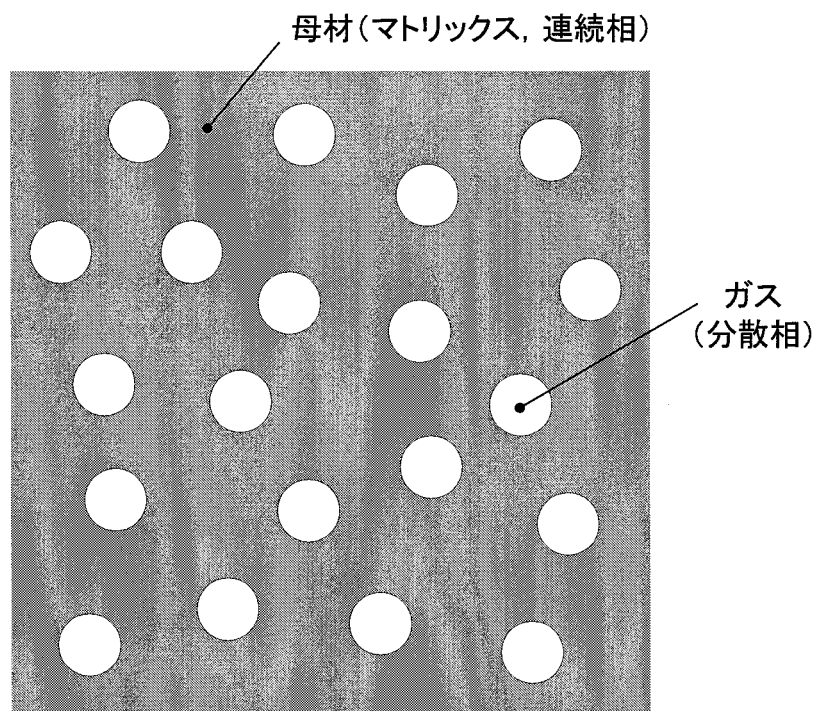


図 4-1 気泡分散モデル

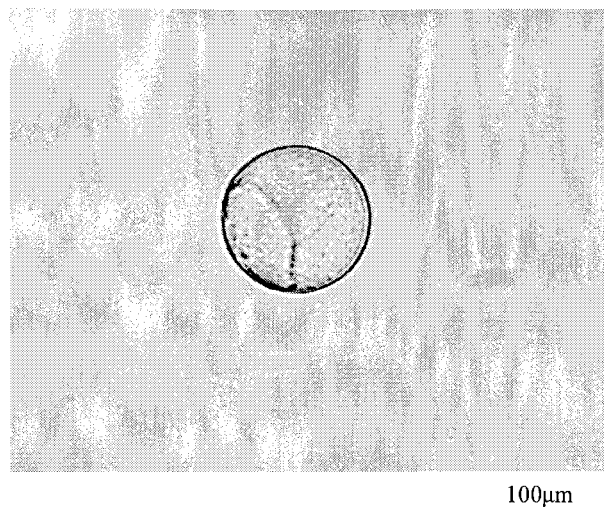


図 4-2 マイクロカプセルの実体顕微鏡写真

-11.7℃)を内包した微粒子を 150～200℃の炉内に入れ、殻膜の軟化とイソブタンの気化膨張を利用して製造したものである。従って、殻膜自体は塑性変形をしており、室温にもどしてももとに戻ることはない。図 4-2 に中空マイクロカプセルの光学顕微鏡写真を示す。ほぼ完全な球形をしているため、内圧が大気圧より高く、殻膜に張力が働いている可能性がある。

このマイクロカプセルが柔軟な殻膜を持つ中空構造であるかどうかを確認するために、試料雰囲気圧力を制御しながら光学実体顕微鏡による観察ができるような耐圧チャンバを製作した(図 3-5)。15MPa 気圧の窒素ガスボンベから高圧ガスを耐圧チャンバに送って加圧をし、加圧量の制御はレギュレータを用いて行った。

大気圧下から順に 0.9MPa まで上げた場合の一連の光学顕微鏡写真を図 4-3 に示す。圧力が増すにつれて収縮しているが、球体を保ちながら収縮するのではなく、殻膜が折れ曲がりしわになった状態で収縮が進む様子が観察できる。

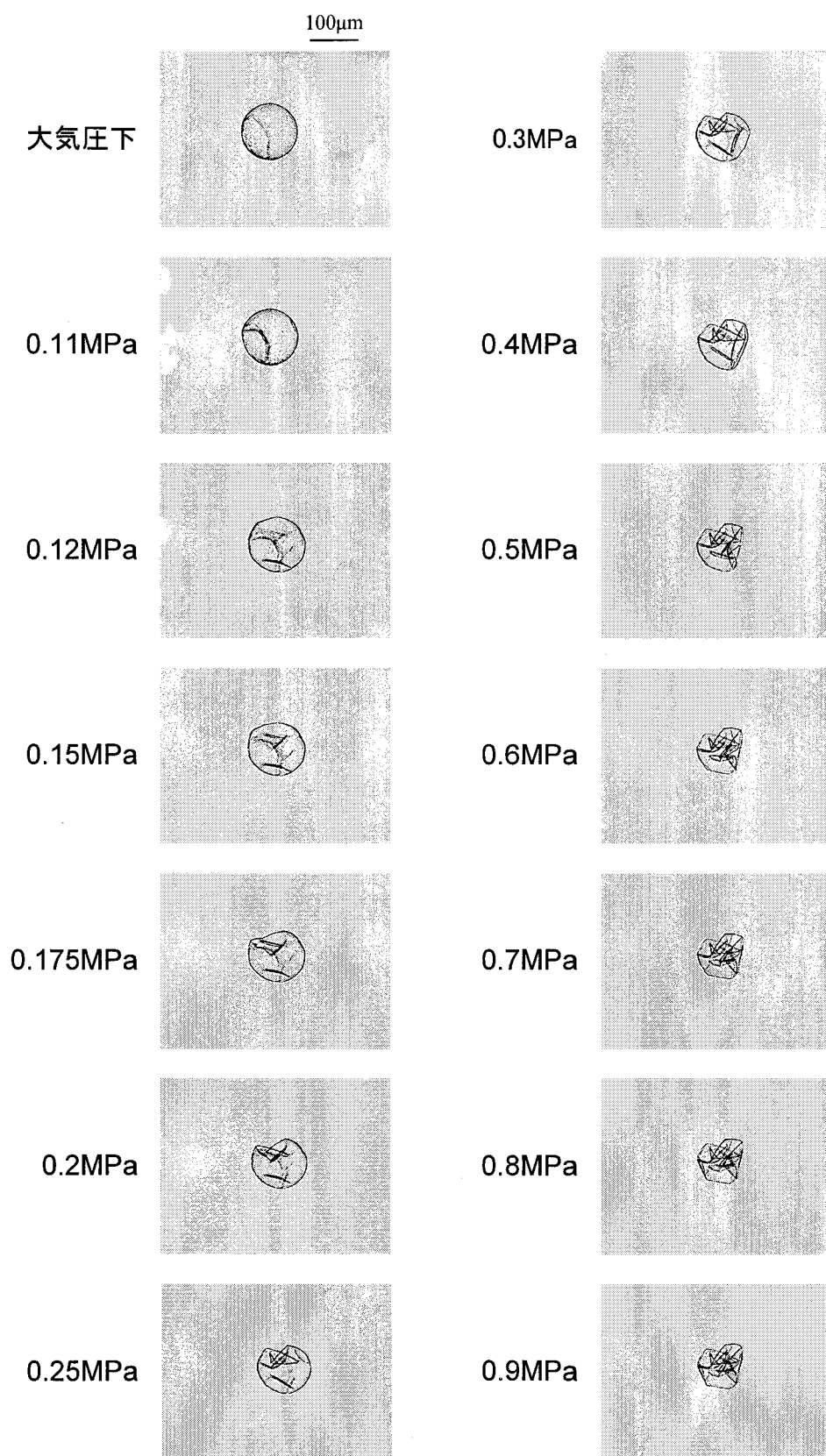


図 4-3 加圧下におけるマイクロカプセルの実体顕微鏡写真

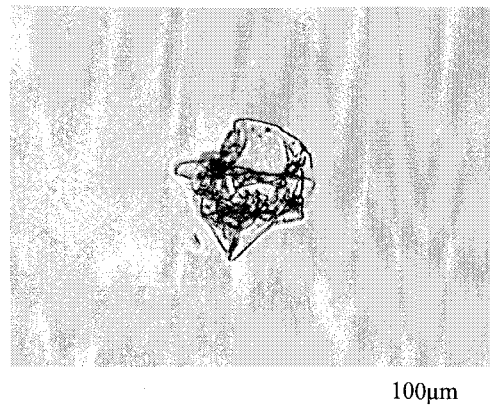


図 4-4 破裂したマイクロカプセル

また、図 4-4 に破裂させたマイクロカプセルを示すが、この場合にも膜に多数のしわがみられる。これらの観察から、殻膜はすでに弾性をほとんど失っており、マイクロカプセル内部のガス圧がこの殻膜に張力を与えて球体を維持しているものと推察される。

前章で述べたように、分散系理論では分散媒と分散質間の界面現象を考慮していない。そこで前提条件に近づけるために、有機溶剤のアセトン中にマイクロカプセルを浸漬することでカプセル表面を一部溶かして内包ガスを抜き、内圧を大気圧まで落とすことにした。図 4-5 にアセトンによる前処理を行ったマイクロカプセルを大気圧下から加圧した場合の顕微鏡写真を示す。大気圧下で既にカプセルにはしわが出来ており、加圧するとすぐに収縮を開始している。このことは殻膜には張力がなく、紙風船のような状態になっていることを意味する。よって本実験では気泡分散寒天ゲルの調製時に、アセトンによる処理を行うことにした。

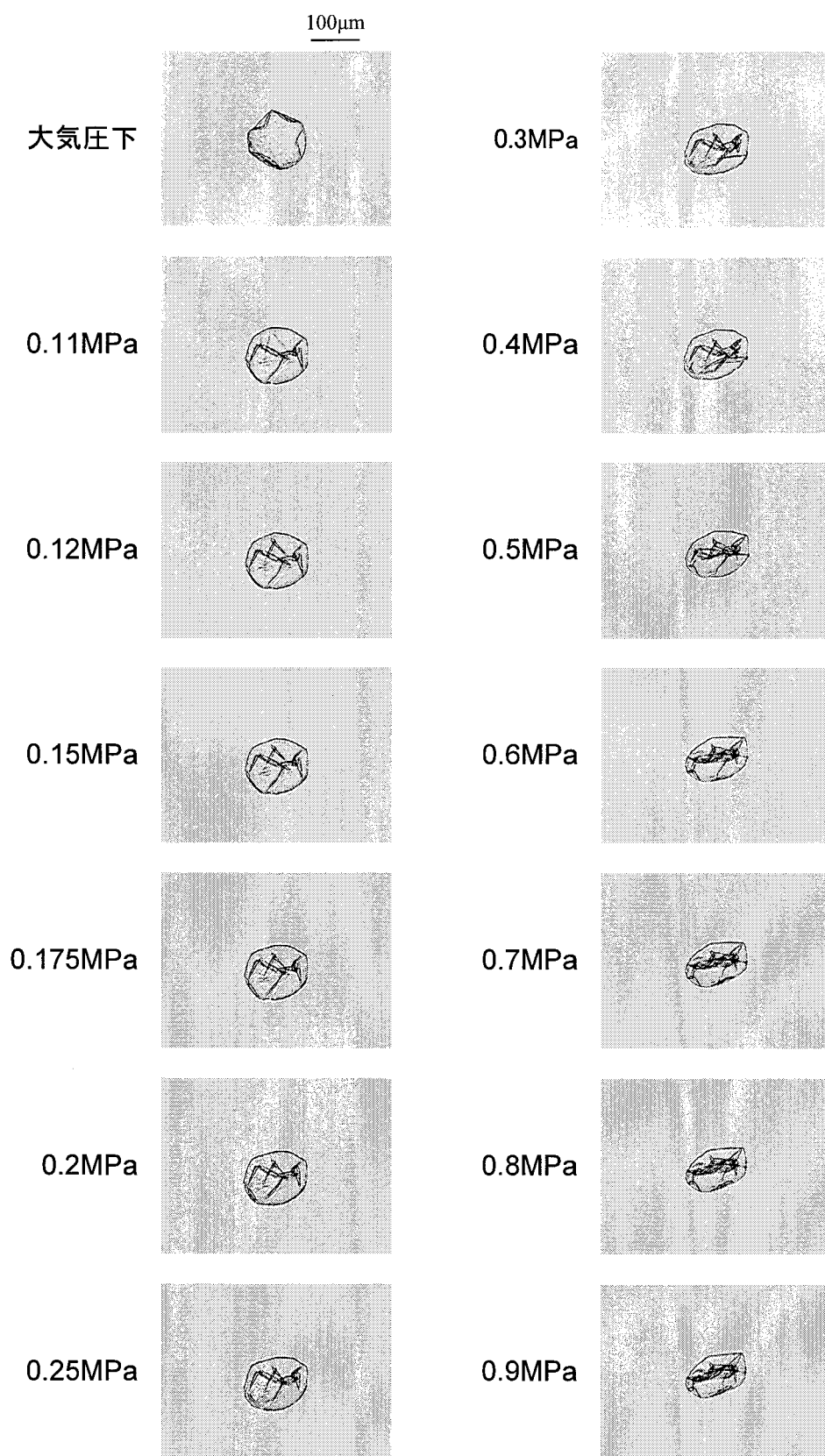


図 4-5 アセトンによる表面処理を施したマイクロカプセルの加圧下観察

4.2.1.2. 試料調製法

試料調製は、マイクロカプセルの前処理、寒天原液の調整、カプセルの寒天原液中への混入、型入れ、冷却の手順で行った。

マイクロカプセルの前処理は、前節で述べたアセトンによる減圧処理に加えて、粒径のばらつきを減少させるために、目開き $90\mu\text{m}$ のフィルタによる篩い分けを行った。使用したマイクロカプセルの粒度分布が $50\sim 100\mu\text{m}$ であるため、粒径はおおよそ $90\sim 100\mu\text{m}$ になる。具体的な手順は、図 4-6 に示すとおりである。

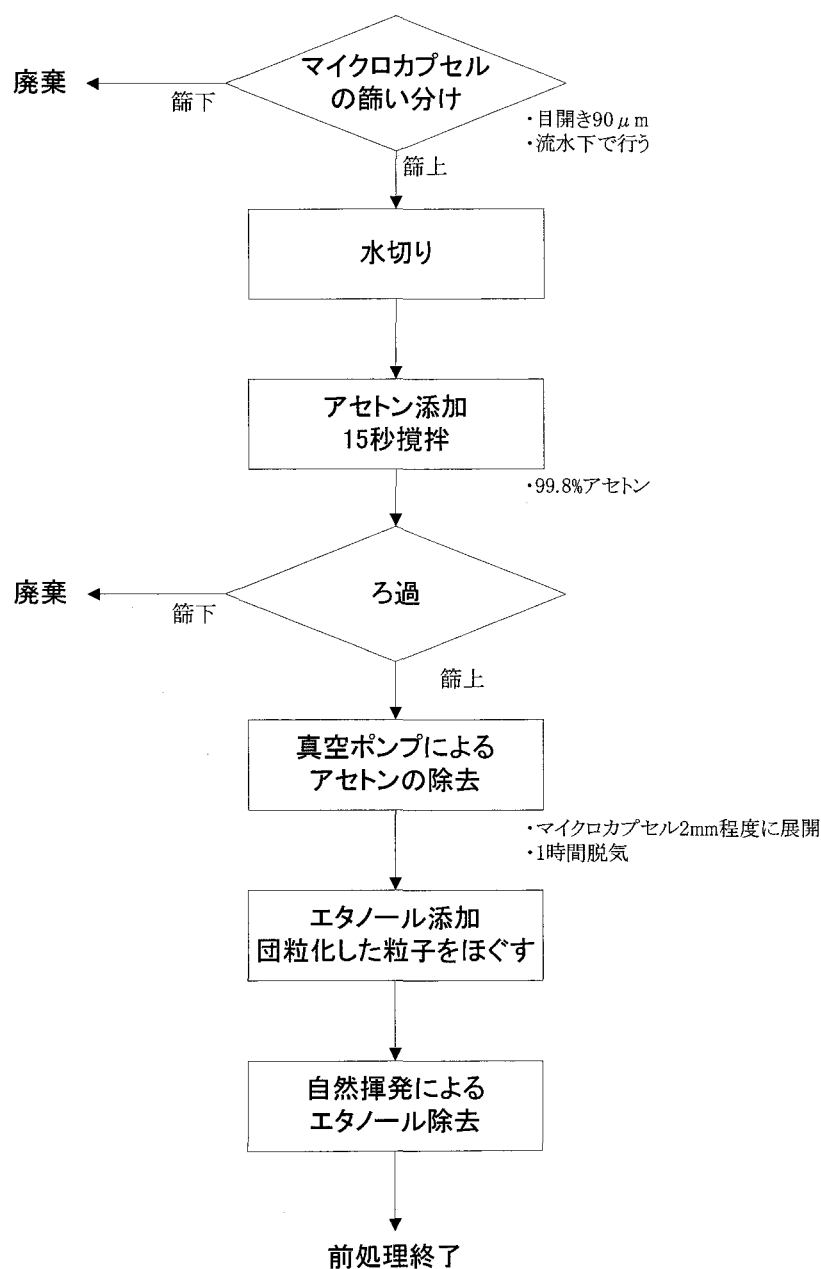


図 4-6 マイクロカプセルの前処理工程

寒天ゲルの硬さ及びガス体積分率は、それぞれ寒天末及びマイクロカプセルの重量パーセントを変動させることで調節した。

寒天末(ナカライテスク製)を沸騰蒸留水に加えて溶解させた後、マイクロカプセルを加えて攪拌しながら冷却する。原液粘度が大きくなったところで、図 4-7 に示す容器(内径 50mm, 深さ 5mm)に流し込み、上蓋で容器上面をふさぐ。上蓋には穴(径 8mm)があり、余分な原液はここから溢れ出る。容器全体を不透水性薄膜(パラフィルム)で密封し、底面を氷水中につけて急冷固化した後、実験に供試するまで 20℃のインキュベータ内に静置した。手順の詳細を図 4-8 に示す。

本実験では、同一ロット内ではゲルの特性はほぼ均一であるとみなし、同一ロットよりコルクボーラを用いて直径 10mm 厚さ 5mm の試料を 3 枚切り出し、大気圧下の超音波縦波音速及び準静的ヤング率計測、加圧下の超音波縦波音速及び準静的ヤング率計測、ガス体積分率計測にそれぞれ供試した。

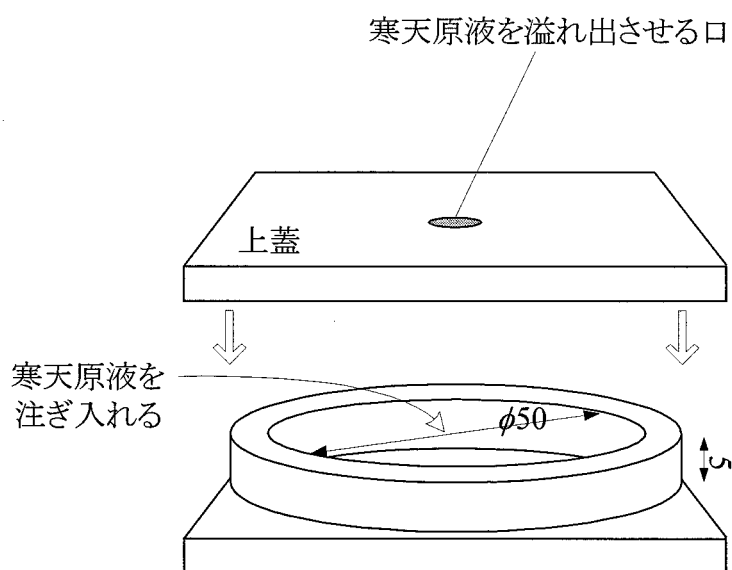


図 4-7 寒天ゲル試料の成型用セル

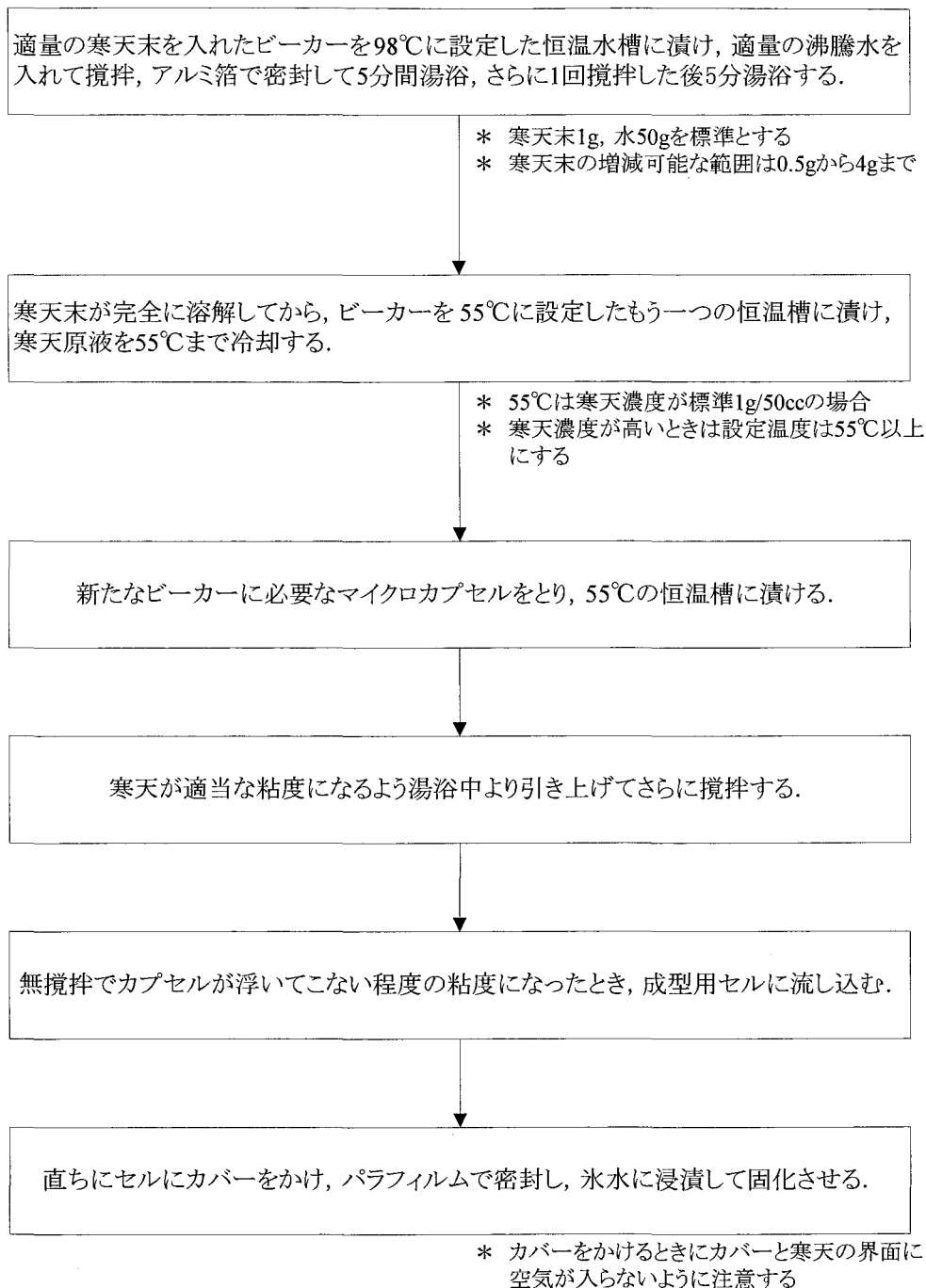


図 4-8 気泡分散寒天ゲル製作手順

4.2.1.3. 実験装置及び計測方法

(1) 実験装置

図 4-9 に計測系の概略図を示す. 計測部は, 超音波縦波音速及びみかけの準静的ヤング率を計測する部分と試料中のガス体積を計測する部分から構成される.

超音波縦波音速及び準静的ヤング率の計測部は密閉式の圧力チャンバ(図 4-10)内にあり, 高圧窒素ガスを外部より導入し, チャンバ内の圧力を上げながら計測することが可能である. 超音波の送受波子には AE 用センサ(送波子:NF 回路設計ブロック製, AE-901E, 共振周波数 140kHz, 受波子: AE-901S-WP, 共振周波数 140kHz)を用いた. 試料にはセンサとの間の音響カップリング材としてごく少量の水を塗布した後, 受波子の上に試料を置き, さらにその試料の上に送波子(12.3g)を置く(図 4-10 参照). 波形発生器(NF 回路設計ブロック製, 1940)より幅 $3.57\mu\text{s}$ の矩形パルスを送波子に入力し, 受波子で受けた信号をデジタルストレージオシロスコープ(横河電機製, DL1200)にて AD 変換後, コンピュータに転送し, データ処理を行った.

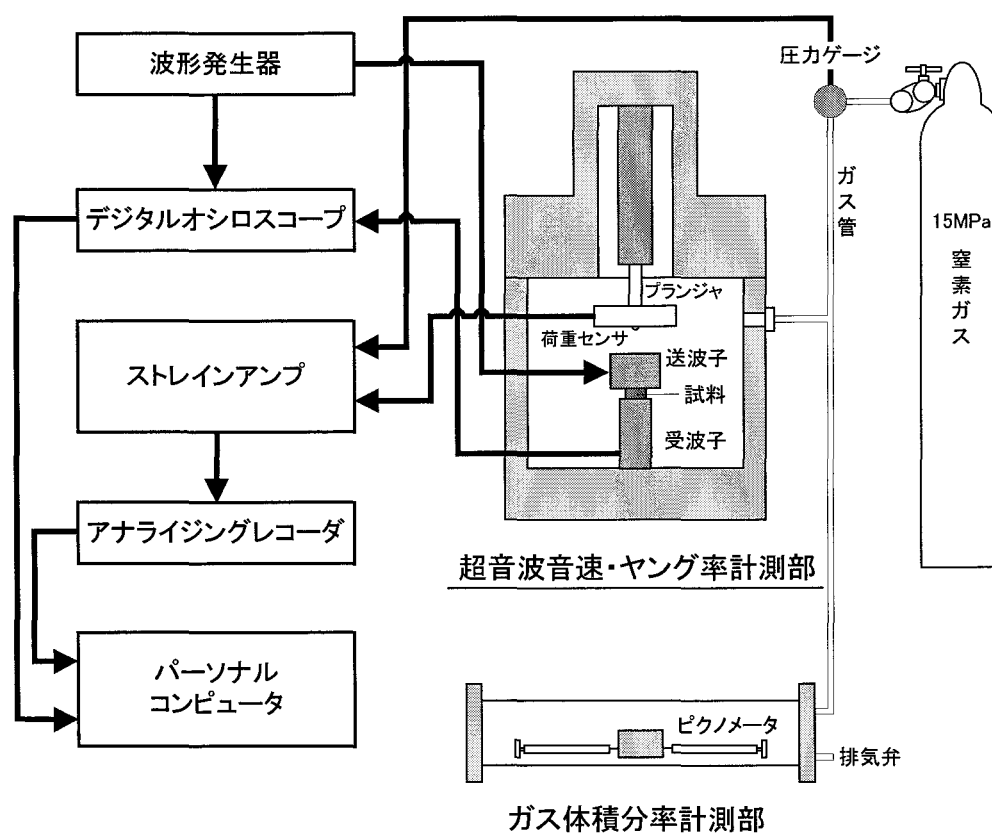


図 4-9 計測系の概略図

準静的ヤング率計測は荷重センサ(共和電業製特注品, LM-20KA, 耐雰囲気圧 2MPa)を先端に取り付けたプランジャ(中央精機製, AME-25, 最大推力 98N)で超音波送信波子を介して試料を圧縮し(図 4-10 参照), 荷重センサの出力信号をアナライジングレコーダ(横河電機製, 3655E)にてAD変換後, コンピュータに転送し, データ処理を行った.

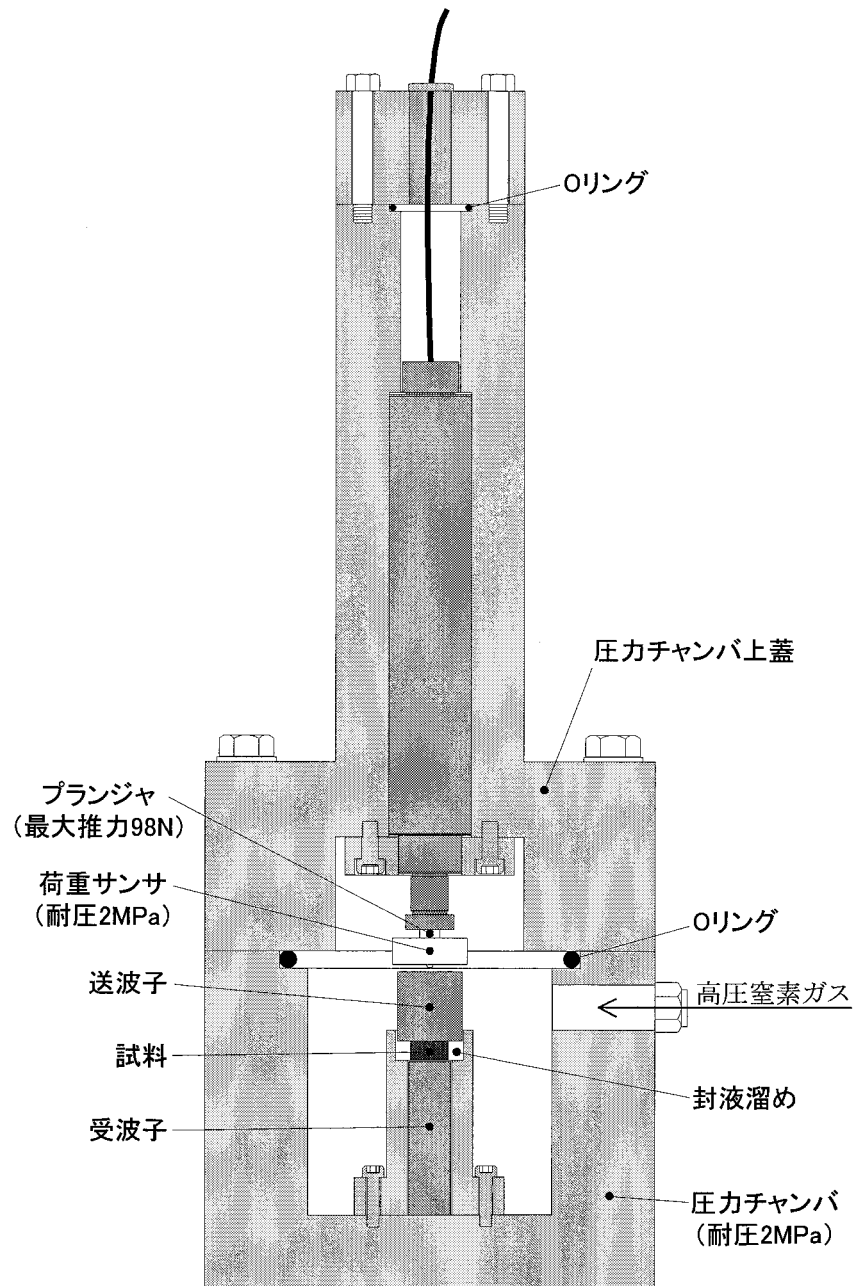
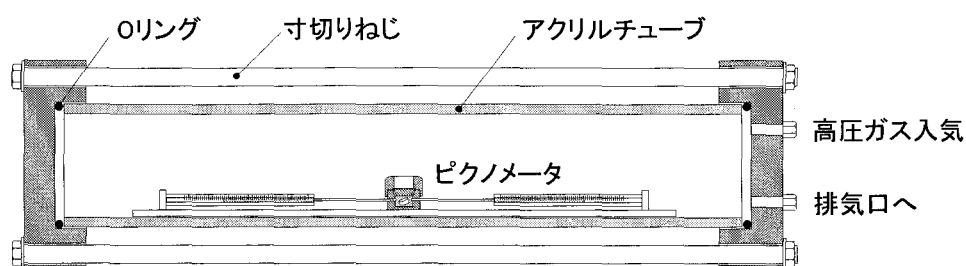
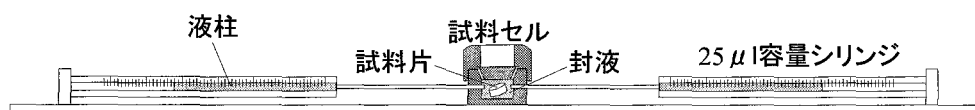


図 4-10 超音波縦波音速・準静的ヤング率計測部



(a) ガス体積分率計測用耐圧チャンバ



(b) ガス体積分率計測用ピクノメータ

図 4-11 ガス体積分率計測部

試料の厚みは、試料をチャンバへセットする前に、レーザ変位計(キーエンス製, LB-040)を用いて計測した。

ガス体積分率計測部はアクリル製の耐圧チャンバ(図 4-11(a))及び目盛付ピクノメータ(図 4-11(b), 特注品)から構成され、高圧窒素ガスを注入することでチャンバ内圧の制御を行った。また図 4-9 に示すようにガス体積分率計測部と超音波縦波音速・準静的ヤング率計測部はガス管を通じて連絡があり、常に雰囲気気圧が同一になるようにした。

(2) 超音波縦波音速計測

試料厚を超音波の伝播経路長(path length)とし、それを試料に信号が入力されてから超音波が試料中を伝播して受波子で受信されるまでの伝播時間(flight time)で除したものを超音波縦波音速と定義した。

送受波子間に寒天ゲル試料をはさみ、矩形パルスを入力した時の受波信号の計測例を図 4-12 に示す。受波信号は SN 比の向上のため 256 回の同期加算を行った。このグラフより入力パルスと受波信号の立ち上がりの時間差を読み取ることができる。実際の計測回路では、計測系の持つ遅れ時間が存在するが、厳密にはグラフから読み取った時間差からこれを差し引く必要がある。そこで、本研究では、送受波子を十分延展したパラフィルムをはさん

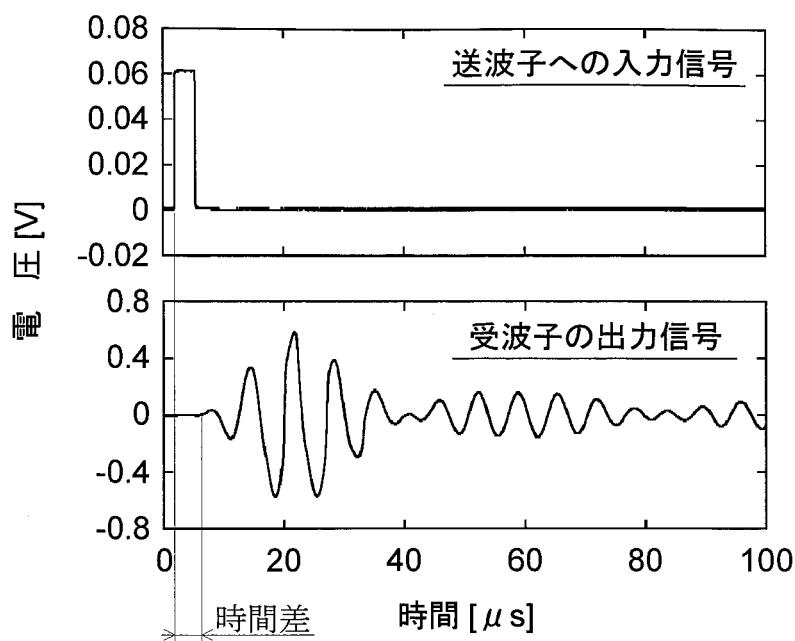


図 4-12 寒天ゲルの超音波計測波形例

で対向させて計測したときに読み取った時間差を回路内遅れ時間 ($0.2648 \mu s$) とした。

(3) みかけの準静的ヤング率計測

図 4-10 に示すように、送受波子で試料を挟んだ状態のまま 4mm/min の速度で載荷しながらその反力の経時変化を計測した計測例を図 4-13 に示す。ほとんどの寒天試料で、圧縮開始直後から約 10%歪まではほぼ直線状に反力が増加していた。そこで 5%歪までの応力-歪線の傾きをもってみかけの準静的ヤング率と定義した。

(4) ガス体積分率計測

試料体積に対するガス含有量の百分率をガス体積分率と定義した。

まず試料体積を 6.5ml 容量のピクノメータを用いた液体置換法で計測した。その後、体積計測に用いた試料を用いて、Sakiyama の方法²⁾に従って試料内ガス含有量を決定した。雰囲気気圧を高めると試料容積は減少するが、試料を構成する水とガスのうち、水は非圧縮性であるため、この減少量は圧縮性のガスの容積減少量と等しいとみなせる。雰囲気気圧をゆっくり増加(上限 1MPa まで)させながら、試料容積を計測した場合、圧力の逆数と試料容積の関係は、ボイル・シャルルの法則より直線となる。図 4-14 に加圧に伴う気泡分散寒天ゲルの体積変動の計測例を示すが、予測通り直線関係が見られる。圧力の逆数が零の場合の試料容積を外挿で求め、初期容積から差し引くことで、試料中のガス含有量を推定することができる。

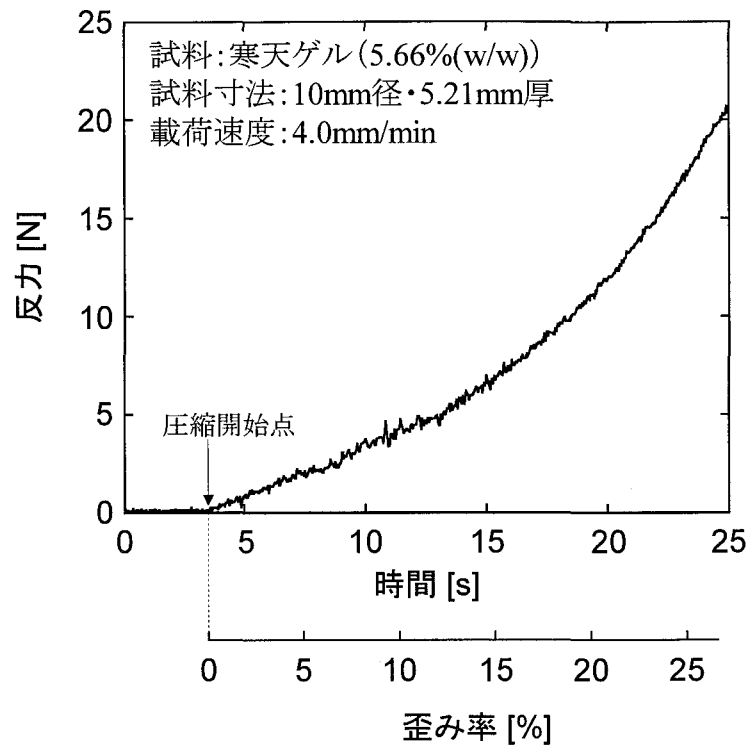


図 4-13 みかけの準静的ヤング率計測例

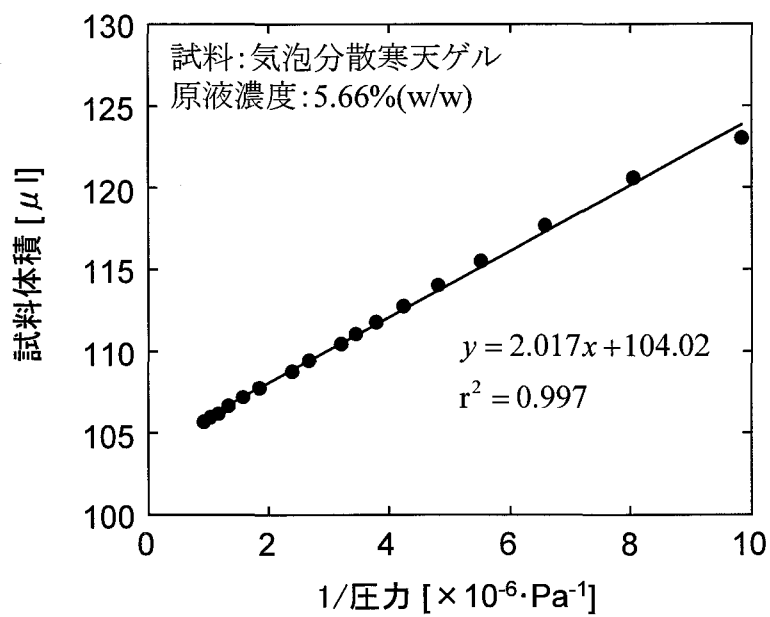


図 4-14 加圧に伴う気泡分散寒天ゲルの体積変動

(5) 実験手順

気泡分散寒天ゲルではマイクロカプセルの含有率を変えることで気泡量を人為的に制御することができるため、ガス体積分率が超音波縦波音速、みかけの準静的ヤング率に及ぼす影響について検討するためには都合のいい試料ということができる。従って、本章冒頭で述べたように、加圧操作でしかガス体積分率を人為的に制御する手段をもたない果菜・根菜類試料とは異なり、加圧下での計測は本来不要である。しかし次の理由で寒天ゲルにおいても加圧下計測を行うこととした。

- 1) 同じロットの寒天でガス体積分率を広範囲にとることが容易である
- 2) 異なるガス体積分率の試料を数多く準備する必要がない
- 3) 加圧下計測での問題点があれば、その知見を果菜・根菜類試料の加圧下計測に活かすことができる

加圧下実験では、高圧(15MPa)窒素ガスを試料チャンバに注入し、大気圧から約 1MPa までの範囲で雰囲気圧を制御しながら、超音波縦波音速・準静的ヤング率計測を行った。その際、試料の厚みも減少するが、並行するガス体積分率計測での試料体積の減少率から試料体積減少量を推定し、等方的に収縮したとして厚みの修正を行った。

1 回の計測に必要な三つの試料が、計測中にどのように使用されるかという視点から、計測全体の流れをまとめたものを図 4-15 に示す。

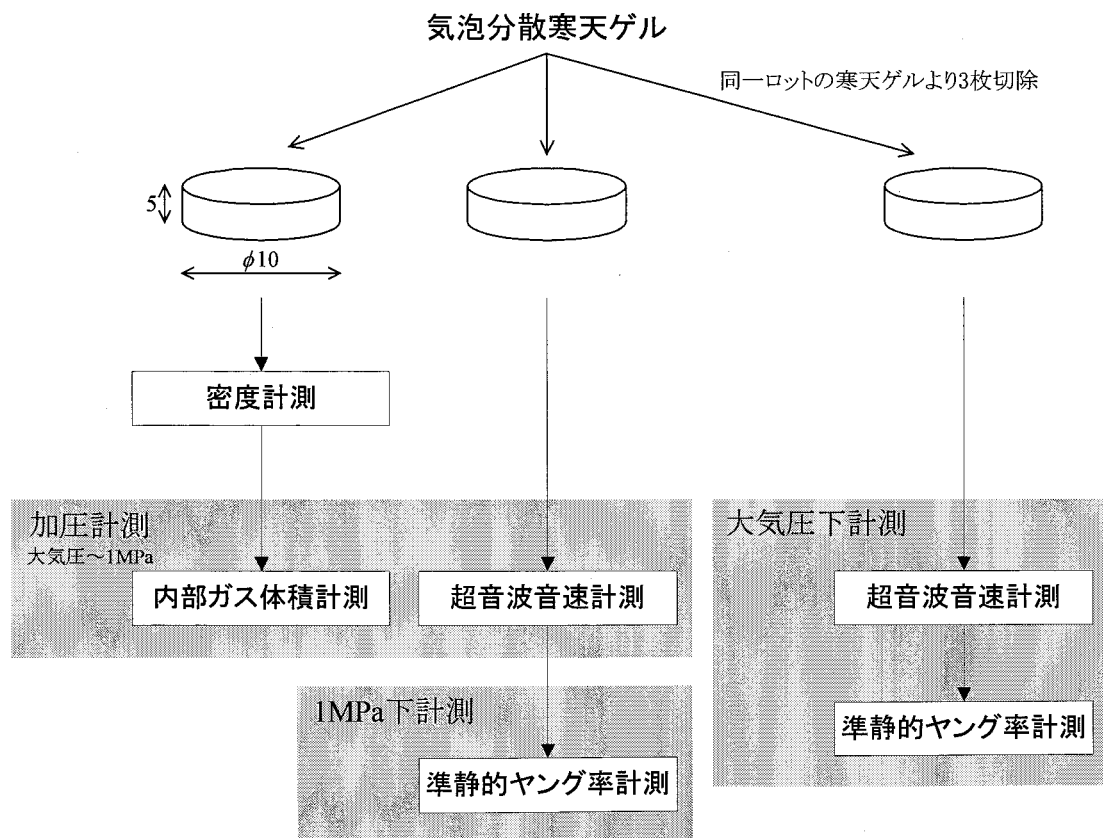


図 4-15 寒天ゲル試料を用いた実験の流れ

一つのロットから三つの試料(直径 10mm 厚さ 5mm)を作製する。そのうち一つの試料をピクノメータに入れ、置換媒体に蒸留水を用いた液体置換法により体積と密度の計測を行う。その間、残り 2 試料は表面が乾かないように不透水性薄膜(パラフィルム)で密封しておく。ピクノメータより取り出した試料を、封液(蒸留水)とともにガス体積計に入れて閉栓し、ガス体積計ごとガス体積分率計測用の圧力チャンバにセットする。残る 2 試料のうち 1 試料を超音波縦波音速計測部の送受波子にはさみ、圧力チャンバの蓋を閉じる。その後、大気圧下で超音波縦波音速を計測した後、圧力チャンバ内の圧力をレギュレータで調節しながら音速の計測及びガス体積計の目盛りの読み取りを行う。大気圧から 0.3MPa までは 0.025MPa 刻みで、0.4MPa までは 0.05MPa 刻みで、その後、1MPa までは 0.1MPa 刻みで合計 16 ステップの加圧操作を行う。そして 1MPa に達したら、音速、ガス体積測定の後準静的ヤング率試験を行う。その後、除圧して、三つ目の試料を再び超音波縦波音速計測部にセットし、大気圧下で超音波縦波音速と準静的ヤング率の計測を行う。データはすべて制御用コンピュータに保存され、実験終了後に、ガス体積分率、超音波縦波音速、準静的ヤング率を算出する。

4.2.2. 結果及び考察

4.2.2.1. 計測精度

本計測システムの超音波縦波音速測定確度・精度を検討するために直径 10mm、厚み 5mm 及び 7mm の石英ガラスの超音波縦波音速を 30 回繰り返し計測した結果を表 4-1 に示す。平均音速については、石英ガラスの文献値 5959.4m/s³⁾より約 40m/s 大きい、一般に固体工業材料の音速は試料の純度、加工方法の違いで 100m/s 程度の相違が生ずる³⁾

表 4-1 石英ガラスの超音波縦波音速計測結果

	5mm 厚	7mm 厚
縦波音速		
平均値 [m/s]	5999.2	5998.2
変動係数 [%]	1.49	0.79
厚さ		
平均値 [mm]	5.05	7.03
変動係数 [%]	0.118	0.105
伝播時間		
平均値 [μ s]	0.842	1.17
変動係数 [%]	1.49	0.80
標本数	30	30

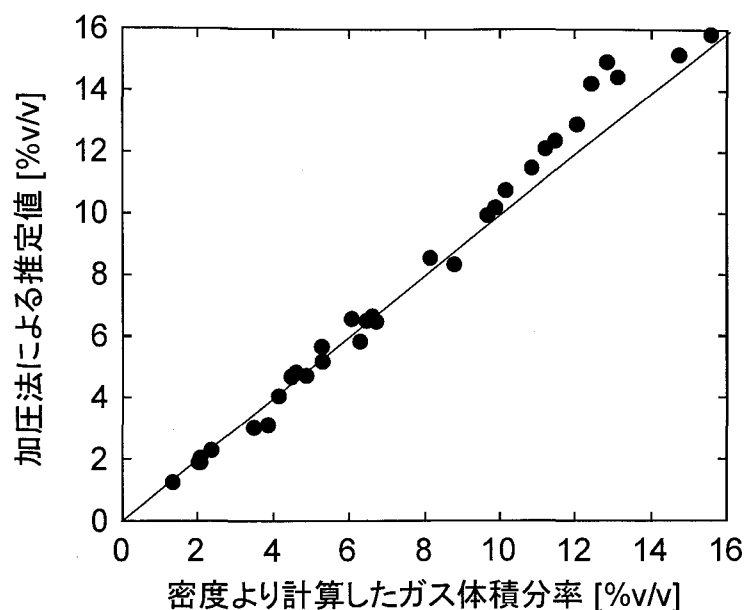


図 4-16 ガス体積分率と密度

とされており，計測値は妥当であると判断できる．変動係数については最大で約 1.5%であり，今回の気泡分散寒天ゲルを用いた実験において超音波縦波音速の変動領域が 120m/s～1380m/s であったことを考慮すればこの精度は結果的に十分容認できた．また 7mm 厚の方が変動係数が小さくなったが，これは伝播時間が延びた分，伝播時間の変動係数が小さくなったためである．石英ガラスよりも伝播時間が遅い寒天ゲルで計測した結果，変動係数は約 0.48% (標本数 18) であった．

ガス体積分率は試料密度からも算出できる．両方法で得たガス体積分率の関係を図 4-16 に示す．試料作製前にマイクロカプセルの内圧を下げる操作を行っているものの，まだ内圧が若干陽圧であるカプセルが残っていたために加圧操作によるガス体積の収縮開始が遅れ，外挿による推定値を低く見積もる傾向がみられる．またガス体積分率が高いほど，つまり外挿直線の傾きの絶対値が大きいほど，この影響は大きくなると考えられる．実際，ガス体積分率が高いほど密度による推定値をやや下まわる傾向がみられたが，全体的には両者の値はほぼ一致した．密度による推定値を基準とした場合の標準誤差は 0.75%(v/v) であり，また誤差が主に 12%(v/v) 以上の部分で発生していることからみて，本計測法による値は妥当なものと判断した．

4.2.2.2. 加圧操作の影響

連続相の超音波縦波音速，準静的ヤング率，密度の加圧による影響を検討するために，寒天濃度を 3 段階に変えたゲルについて，それぞれ大気圧下と加圧下 (1MPa) での計測を行った．大気圧下の値に対する加圧下の値の比を計算した結果を表 4-2 に示す．超音波

表 4-2 無気泡寒天ゲルの加圧による超音波縦波音速・準静的ヤング率・密度への影響

大気圧下の値に対する 1MPa 下の値の比 (標本数各 9)		
	平均 [—]	変動係数 [%]
縦波音速	1.003	0.216
準静的ヤング率	1.006	3.80
密度	0.998	0.054

縦波音速比と密度比の平均はほぼ1, 変動係数は 0.2%以下であり, 本実験では加圧の影響を考えなくてもよいと考えられる. 準静的ヤング率については, 平均はほぼ 1 であるが変動係数が約 3.8%と若干大きい結果となった. しかし大気圧下のヤング率計測での変動係数が約 3.6%(標本数 9)とほぼ同じ大きさであるため, データに与える加圧の影響は小さいと判断した.

4.2.2.3. 大気圧下実験

無気泡寒天ゲルの準静的ヤング率と超音波縦波音速の関係を図 4-17 中の「無気泡試料」として囲った部分に示す. 無気泡試料データについて準静的ヤング率と超音波縦波音速の相関を考えた場合, その決定係数 r^2 は 0.034 であり, 超音波縦波音速の差異を見出すことはできなかった. 気泡を含まない寒天ゲルの音速値は約 1380m/s であり, 水の音速 1483m/s (20℃時)に近い. 無限媒体中での縦波音速は

$$c_l = \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(K + \frac{4}{3} G \right)}$$

で表されるが, 水の場合は剛性率 G を零, 体積弾性率 K を 2.22GPa, 密度 ρ を 1000kg/m³ として, この式から得られる音速値 1490m/s と実測値とはほぼ同じ値をとる. 寒天ゲルの主成分が水であることから, その体積弾性率は水に近く, 剛性率は零ではないものの体積弾性率に比して極めて小さいと考えられるため, その音速は水の音速値に近いと考えられる. 無限媒体は現実にはあり得ない仮想の媒体であるが, 無限媒体近似理論音速と近い値を実測値がとることから, 事実上, 無限媒体近似が可能であると言えよう. 準静的ヤング率の異なる試料間に超音波縦波音速の差異を見出せなかったのは, 前章図 3-11 に示したように, 寒天の断熱ヤング率や断熱剛性率が断熱体積弾性率よりも小さく, 3 倍程度の硬度の変化は超音波縦波音速にほとんど反映されなかったためであると考えられる.

次にガスを 15.6%(v/v)までの範囲で分散させた寒天ゲルの超音波縦波音速と準静的ヤ

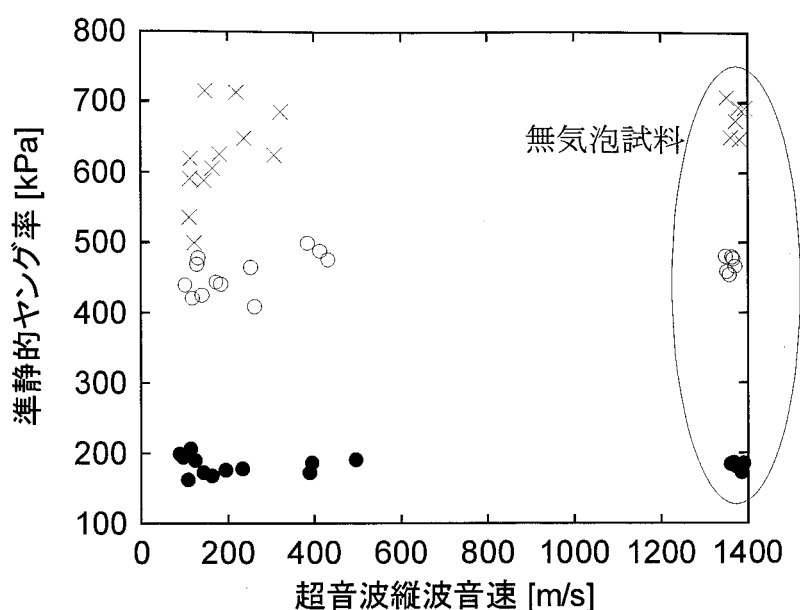


図 4-17 無気泡及び気泡分散寒天ゲルの準静的ヤング率と超音波縦波音速

- 寒天濃度 1.96%(w/w)
- 寒天濃度 3.85%(w/w)
- × 寒天濃度 5.66%(w/w)

ング率の関係を同じく図 4-17 中に示す. r^2 は 0.0006 であり, 両者に相関はほとんどみられなかった. 超音波縦波音速は 90~500m/s の範囲で変動し, その変動範囲は各濃度別に見てもほぼ同一であることから, この超音波縦波音速の変動は寒天ゲルの硬度によるものではないと言える.

図 4-18 に気泡分散寒天ゲルのガス体積分率と超音波縦波音速の関係について示す. これも図 3-15 で予想されたようにガス体積分率が小さくなるほど, 超音波縦波音速が増加することが確認された. また原液濃度別にみると, ガス体積分率が約 5%(v/v)以下の場合にはほとんど差が見られないが, 5%(v/v)以上になると, 濃度が高くなるほど, つまり硬度が上がるほど音速が高くなり, 最大約 40m/s の差が生じた. これは図 3-11 に示すように, ガス体積分率が上がると体積弾性率に対するヤング率の相対的な大きさが増すためヤング率の変動が超音波縦波音速に反映しやすくなったためであると考えられる.

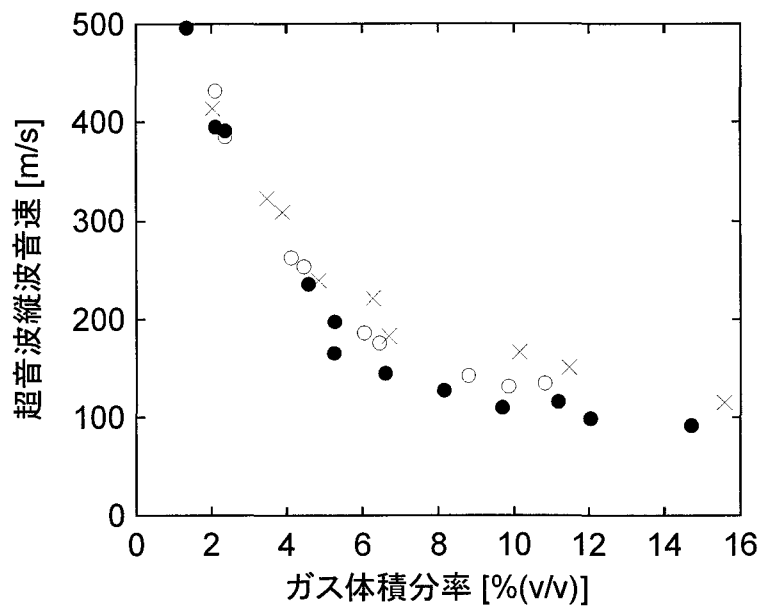


図 4-18 気泡分散寒天ゲルのガス体積分率と超音波縦波音速

- 寒天濃度 1.96%(w/w)
- 寒天濃度 3.85%(w/w)
- × 寒天濃度 5.66%(w/w)

4.2.2.4. 加圧下実験

15.6%(v/v)までの範囲でガスを分散させた気泡分散寒天ゲルについて 1MPa までの範囲で加圧しながら計測を行った結果について、加圧下の超音波縦波音速と準静的ヤング率、ガス体積分率と超音波縦波音速の関係をそれぞれ図 4-19、図 4-20 に示す。図 4-19 の r^2 は 0.003 であり、大気圧下と同様、超音波縦波音速と準静的ヤング率の間には相関はなかった。また超音波縦波音速は 90~1380m/s の範囲で変動し、その変動範囲には濃度による差がみられなかった。図 4-20 については図 4-18 と同様、ガス体積分率が小さくなるほど、超音波縦波音速が増加した。また、ガス体積分率が零に近づくにつれて、ガスを含まない寒天ゲルの超音波縦波音速値(約 1380m/s)に近づいた。理論音速値は、(3-14)式に、連続相である寒天の断熱体積弾性率 K_1 、ポアソン比 ν_1 、密度 ρ_1 を代入することで算出できる。 ρ_1 に実測値(1008.2kg/m³)を用い、 K_1 と ν_1 は直接測定することが困難なので、水の K_1 と ν_1 近傍で、縦波音速値が 1380m/s となるようにそれぞれ 1.92GPa, 0.4996 と決め、(3-14)式に代入して図中に実線で示す理論曲線を得た。曲線の形は良く似ているが、最大誤差約 400m/s と定量的には一致はしなかった。また図中の破線は Levenberg-Marquardt 法に基づく非線形回帰⁴⁾の結果($K_1=1.919\text{GPa}$, $\nu_1=0.4985$, $r^2=0.82$)を示す。最大誤差が約 200m/s と小さくなったが、これも定量的に一致したとは言い難い。しかしいずれも、ガス体積分率が増加するにつれて超音波縦波音速が急減する傾向では一致した。

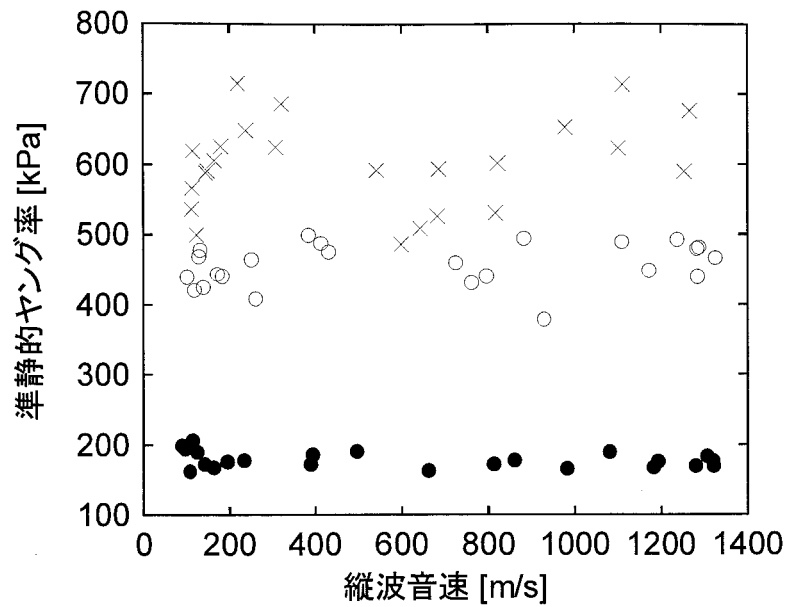


図 4-19 加圧下の気泡分散寒天ゲルの準静的ヤング率と超音波縦波音速

- 寒天濃度 1.96%(w/w)
- 寒天濃度 3.85%(w/w)
- × 寒天濃度 5.66%(w/w)

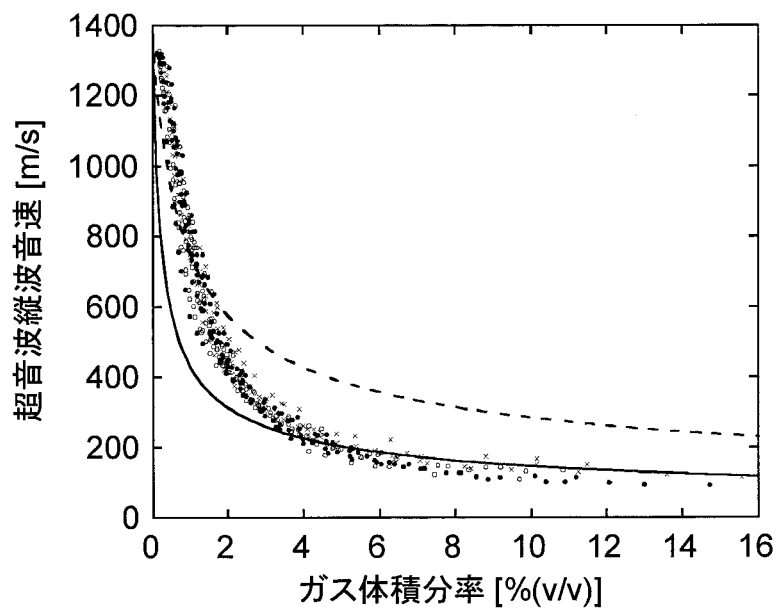


図 4-20 加圧下の気泡分散寒天ゲルのガス体積分率と超音波縦波音速

- 寒天濃度 1.96%(w/w)
- 寒天濃度 3.85%(w/w)
- × 寒天濃度 5.66%(w/w)
- モデル式計算値 ($K_1 = 1.92\text{GPa}$, $\nu_1 = 0.4996$, $\rho_1 = 1008.2\text{kg/m}^3$)
- Levenberg-Marquardt 法による計算値

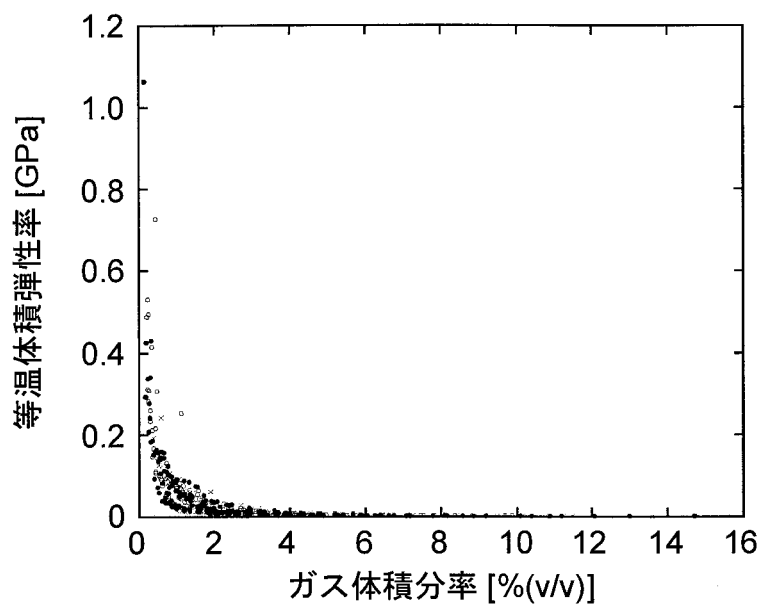


図 4-21 気泡分散寒天ゲルの等温体積弾性率とガス体積分率

- 寒天濃度 1.96%(w/w)
- 寒天濃度 3.85%(w/w)
- × 寒天濃度 5.66%(w/w)

加圧による試料体積の減少量の計測値から推定した等温体積弾性率とガス体積分率の関係を図 4-21 に示す。縦波音速と同様、ガス体積分率が増加するにつれて、体積弾性率が急減していくことがわかる。大きさは異なるが、断熱体積弾性率も同様の傾向を示すことが予想され、このことは図 3-11 での傾向と一致する。

以上のことから、ガス体積分率が 0～15.6%(v/v)の範囲でガスを含む寒天ゲルの超音波縦波音速はヤング率に比べて体積弾性率の影響が大きく、ガス体積分率が小さくなるほど体積弾性率支配に近づくことが明らかとなった。実用化の観点からは、超音波縦波音速から硬さ情報を得ることは困難だが、ガス体積分率あるいは密度情報が得られる可能性があると言える。

4.2.3. まとめ

前章では、連続相にガス球が分散した系で果肉をモデル化し、縦波音速を連続相の物性値とガス体積分率の関数としたモデル式を提案したが、そのモデル式の妥当性を検討するために、気泡分散寒天モデルを用いて実験的に検討を行った。その結果、以下の知見を得た。

- 1) ガス体積分率が 0%(v/v)から 15.6%(v/v)まで増加するにつれて、超音波縦波音速は約 1380m/s から減少し最終的には約 90m/s となった。

- 2) ガス体積分率が約 5%(v/v)以下の場合には、ガス体積分率と超音波縦波音速の関係には、ヤング率の差による影響が見られないが、5%(v/v)以上になると硬度が上がるほど音速が高めに出る傾向があり、その差は最大約 40m/s であった。
- 3) 等温体積弾性率はガス体積分率の増加とともに減少した。
- 4) 提案したモデル式は、例えば超音波縦波音速の実測値との最大誤差は約 200m/s となるなど、定量的には一致しなかったが、1)から 3)項までの現象を定性的に説明することが可能であった。
- 5) 気泡分散寒天ゲルの超音波縦波音速は体積弾性率支配であり、ヤング率の影響は受けにくい。体積弾性率はガス体積分率の影響を大きく受けるため、超音波縦波音速はガス体積分率支配とみることができる。
- 6) ヤング率に与えるガス体積分率の影響を見出すことはできなかった。モデル式から予測される通り、ガス体積分率が体積弾性率に与える影響に比して、ヤング率への影響は小さいということが、その要因として考えられる。

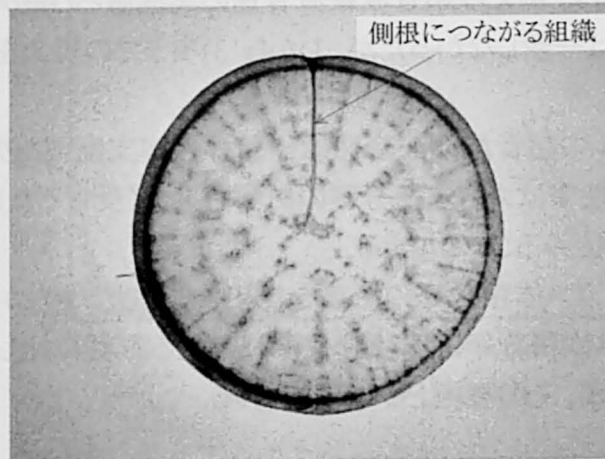
第3節 果菜・根菜類柔組織を用いた実験

4.3.1. 実験方法

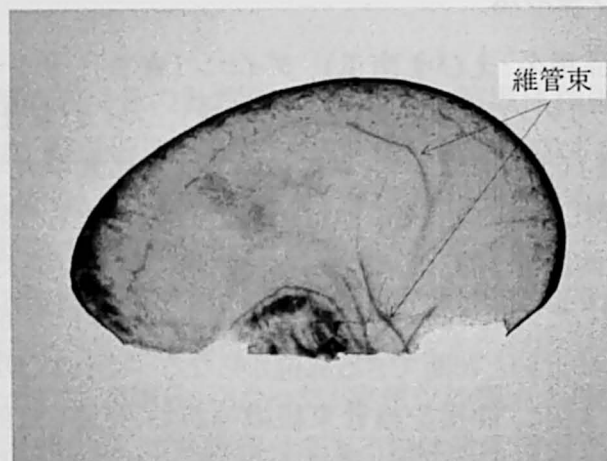
4.3.1.1. 実験試料及び整形法

実験にはカボチャ(品種名:えびす南瓜),ダイコン(青首),サツマイモ(なると金時),ナシ(20 世紀),リンゴ(ラリタン),トウガン(なんぶ琉球),スイカ(富士光),ニンジン(品種不明),バレイショ(男爵薯)を使用した。リンゴについては京都大学大学院農学研究科附属農場で1999年7月に収穫したものを、その他は市場より購入したものを5℃の冷蔵庫に貯蔵し、実験開始1日前より庫内温度10℃のインキュベータ内に移し、さらに計測開始2時間前より約24℃の室内に静置した。同一個体内でも組織内ガス分率に分布があるため、実体顕微鏡による観察から均一に近いと判断できる部位からなるべく小さく切り出して試料とした。例えば、図 4-22 に示すように、側根や維管束組織等がよく発達した部位が見られる場合は、それ以外の部分から切り取るようにした。カボチャ、ナシ、リンゴ、スイカ、トウガンについては柄(梗)基部を極とした場合の赤道上から果軸に対して垂直方向に内径10mmのコルクボーラで打ち抜き、カボチャ、ナシ、リンゴは皮下1.5mm部分より、トウガン、スイカは皮下20~25mm部分より厚み約5mmのディスク状に切り出し、試料とした。サツマイモ、ダイコン、ニンジン、バレイショについては芯部分を長軸方向にコルクボーラで打ち抜き、同様に試料を切り出した。整形後直ちに不透水性薄膜(パラフィルム)で覆い、計測直前まで室温下で静置した。

本実験では、切り出した果肉組織片を3枚の試料A, B, Cに分割し、試料Aを加圧下の超音波縦波音速及び準静的ヤング率計測、試料Bを大気圧下の超音波縦波音速及び準静的ヤング率計測、試料Cを密度及び組織内ガス体積分率に供試した。



ダイコン



リンゴ

図 4-22 ダイコン・リンゴ果肉の維管束走向
いずれも果肉切片を水浸・真空脱気し、空隙を水で置換したもの。

4.3.1.2. 実験装置及び計測方法

(1) 実験装置

前節(図 4-9)と同じ構成の計測システムを用いた。

(2) 超音波縦波音速計測

超音波縦波音速は前節同様、試料を送受波子に挟み、入力パルスの立ち上がりから受波信号の立ち上がりまでの時間から回路遅れ時間を差し引いて求めた伝播時間と試料厚さから算出した。図 4-23 に計測波形の一例を示す。

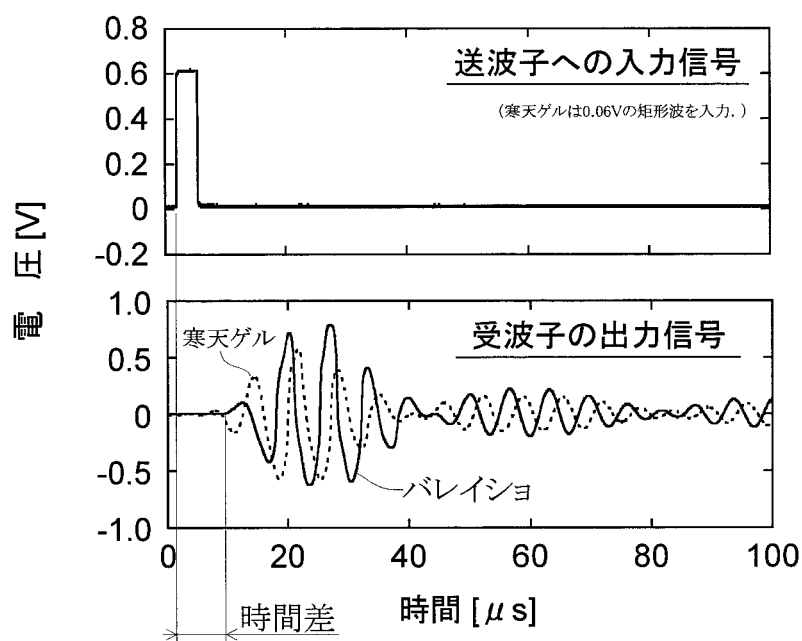


図 4-23 超音波計測波形例

(3) みかけの準静的ヤング率計測

前節のように、試料を送受波子にはさんだまま 4mm/min の速度で载荷しながら反力を計測した。図 4-24 に測定例を示す。いずれも厳密には直線とは呼べないが、果肉硬さが増加するにつれてその傾きは大きくなっているものとして、本実験では 10%歪までの応力—歪線の勾配よりみかけの準静的ヤング率を算出した。音波の伝播現象を扱う場合、音速にかかわる弾性率は断熱弾性率となる。本方式でヤング率を計測した場合、準静的ヤング率となるため、前章の理論式を構成するヤング率の項に直接代入することはできない。しかし断熱弾性率と準静的弾性率には相関があると考えられる⁵⁾ため、準静的弾性率と他の計測パラメータとの関係は、断熱弾性率と他のパラメータとの関係を反映すると考えられる。

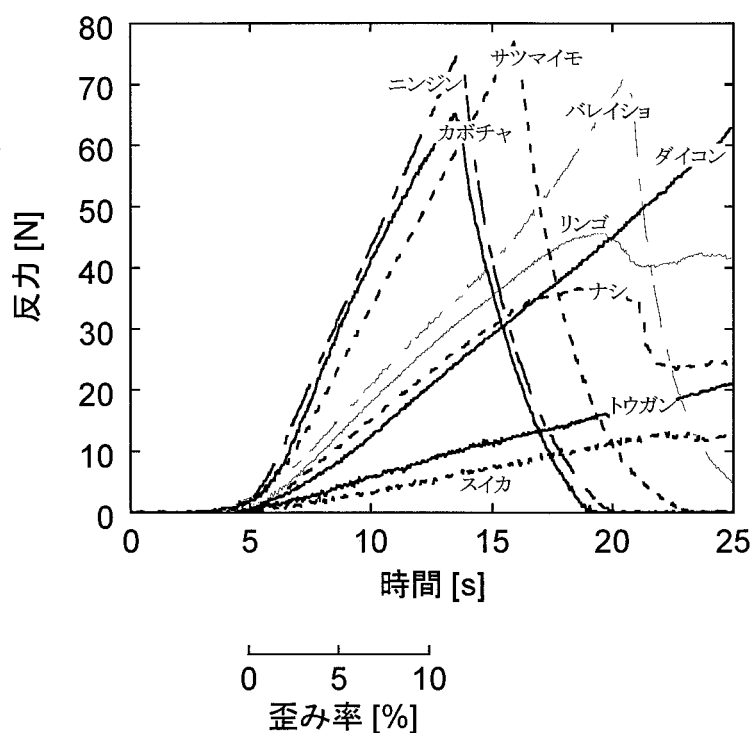
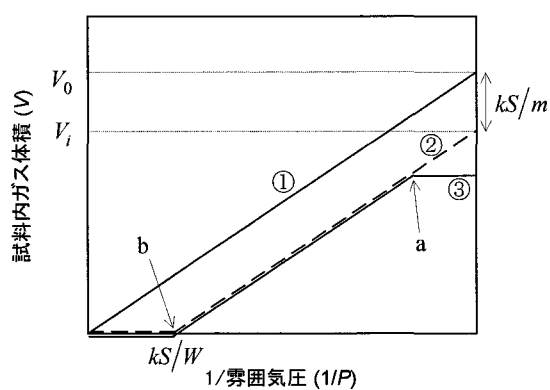


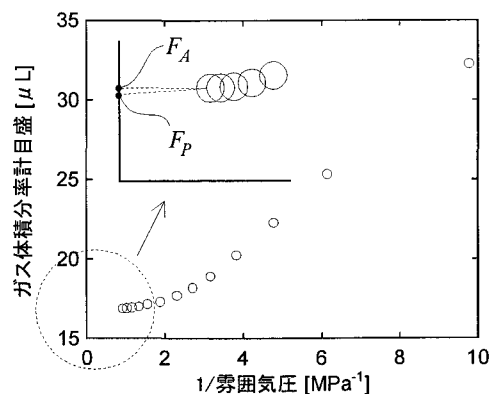
図 4-24 果菜・根菜類の準静的ヤング率計測例

(4) ガス体積分率計測

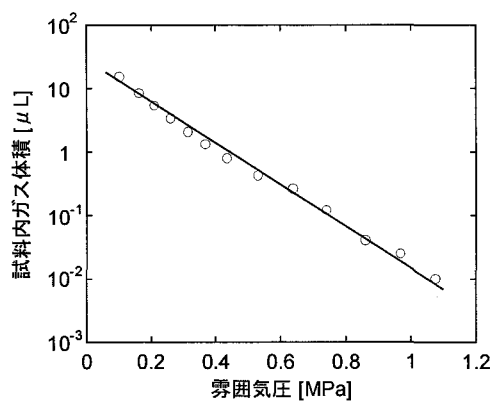
細胞間隙中のガス体積を測定するには、吸引・減圧法あるいは加圧法のいずれかが用いられることが多い。果菜・根菜類組織内には膨圧があり、組織内ガスの圧力が大気圧と異なる場合もあると考えられる²⁾が、吸引・減圧法では捕集したガスの体積量を一定圧下(通常は大気圧下)で計量するため、果肉中に存在している空隙を過大に評価する傾向がある。一方、加圧法ではガスを圧縮することで体積を評価するため、組織内ガス圧に関係なく空孔体積そのものを計測できる。本研究では、果菜・根菜類果肉中の組織内ガス体積を Sakiyama による加圧法²⁾を用いて決定した。試料中のガス以外の成分(大部分は水)が非圧縮性であることから、雰囲気圧の増加に伴う試料体積の減少量は試料内のガス体積の減少量に相当する。実際は圧力チャンバの耐圧限界により加圧量には上限(本計測系では約 1MPa まで)があり、ガス体積を零にするまで加圧することはできない。そこで一定圧力までの体積変化のデータから圧力が無限大のときの体積減少量を推定する必要がある。前節のようにマイクロカプセルを分散させたゲル試料の場合、ガスとゲルはマイクロカプセルの殻膜で仕切られており、ガスが直接ゲルの水に溶解することはほとんどなく、図 4-25(a)の①線のように圧力の逆数と試料容積の関係は直線関係となるため、圧力の逆数が零の場合の試料体積は直線補外によって決定することができる。一方、果菜・根菜類組織の場合、加圧過程で細胞間隙に浸潤した水分にガスが溶解していくために、加圧量が無限大になるまでにガス体積がほとんど零近くなることが予想される。



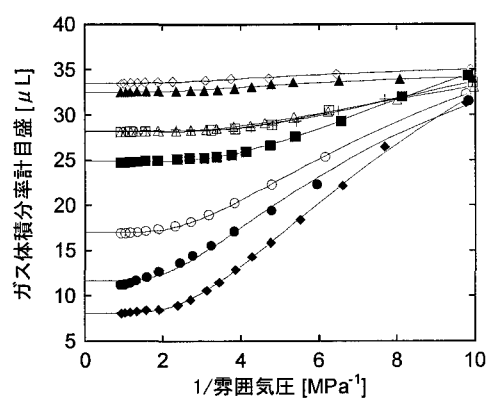
(a) 雰囲気気圧と試料内ガス体積の関係



(b) 加圧によるサツマイモ試料体積の変動



(c) 加圧によるサツマイモ試料内ガス体積分率



(d) 試料体積変動と近似曲線

図 4-25 加圧下における試料体積変化と初期ガス体積の推定

- | | |
|---------|---------|
| ● リンゴ | △ トウガン |
| ◆ カボチャ | □ ナシ |
| ○ サツマイモ | ◇ ニンジン |
| ■ スイカ | ▲ バレイショ |
| + ダイコン | |

ガスが水と共存している場合、圧力 P 下で体積 S の水に溶解するガス質量 W_d はヘンリーの法則により次式で表される。

$$W_d = kSP \quad (4-1)$$

但し、 W_d : 溶解ガス質量[kg], k : 水に対するガスの溶解度[kg/(Pa・m³)], S : 水の体積[m³], P : 圧力(絶対圧)[Pa].

今、一つの細胞間隙空間に体積 S の水と質量 W のガスが圧力 P 下で存在するとき、気相状態のガス体積 V は次式で表される。

$$V = \frac{W - W_d}{mP} \quad (4-2)$$

但し、 m : 大気圧下のガス密度

(4-1)式と(4-2)式を整理すると、

$$V = \frac{W}{m} \cdot \frac{1}{P} - \frac{kS}{m} \quad (4-3)$$

となる。(4-3)式よりこの系の雰囲気圧を上げていくとガス体積 V は $1/P$ に比例して減少していき、やがて $P = W/(kS)$ で $V = 0$ となる(図 4-25(a)②線)。一方、細胞には膨圧があるため、細胞間隙中のガス圧は大気圧よりも大きい場合もある。その場合、それを超えるまでは体積変動はしないため、加圧下のガス体積は図 4-25 (a)③線のように推移すると考えられる²⁾。

図 4-25(b)に加圧に伴う試料体積変動をガス分率計で計測した結果の一例を示す。ガス以外はほとんど非圧縮性の水分からなるため、この体積変動は組織内ガスの体積変動とみなせる。予測通り、雰囲気圧の逆数と試料体積の関係は直線ではなく、加圧量が小さいうちは体積変動も小さいが、やがて直線的に減少し、再び体積変動量が減少し、一定値に収束していく様子がわかる。しかし、図 4-25(a)③線における a 点と b 点が明確でなく、徐々に移行するため、全体的にはシグモイド形の曲線になった。これは、試料内部の膨圧が一様でないため各空隙の内圧が異なること、及び各空隙でガスの接触している水分量が異なるためにガス量を零とする圧力値が異なってくることが原因であると考えられる²⁾。組織内ガス量を求めるためには、加圧操作による変動体積の収束値 F_e が必要になる。この収束値は加圧量が最大時のガス分率計の読み F_A と加圧上限近傍の測定点で直線補外して得られた値 F_p の間に存在すると考えられる。 F_A 、 F_p を基準にそれぞれ算出した組織内ガス体積分率間の差について供試試料の種類別にまとめた結果を表 4-3 に示す。リンゴを除き、その差は平均で 0.17%(v/v)以下、最大でも 0.41%(v/v)であった。リンゴはガス分率が大きく、体積減少率が比較的大きいところで加圧操作を打ち切ることになるため、その差は平均 1.1%(v/v)、最大 2.1%(v/v)と他種より大きくなった。

今、 F_A と F_p の丁度中間の値に収束したと仮定して、試料の初期体積からその収束値を差し引いたものを初期ガス量とし、片対数プロットした結果を図 4-25(c)に示す。この関係はほぼ直線になっていることがわかる。これを数式であらわすと次式のようになる。

$$\ln(F - F_e) = -aP + b \quad (4-4)$$

表 4-3 外挿が組織内ガス体積分率の推定に及ぼす影響

	標本数	ガス体積分率の計算誤差* [% (v/v)]		
		平均	最小	最大
ダイコン	51	0.075	0.001	0.19
サツマイモ	51	0.12	0.017	0.41
カボチャ	56	0.098	0.012	0.26
ナシ	10	0.077	0.010	0.26
リンゴ	69	1.1	0.21	2.1
トウガン	8	0.17	0.005	0.40
スイカ	10	0.13	0.061	0.24
ニンジン	6	0.078	0.035	0.12
パレイシヨ	10	0.078	0.024	0.14

* : 最大加圧下(約 1MPa)の試料体積値から算出したガス体積分率と加圧上限近傍の測定データの直線補外から推定した収束値から算出したガス体積分率の差。

但し, F : ガス分率計の読み, F_e : 加圧処理時の収束値, a, b : 正の定数
これを変形すると,

$$F = \frac{1}{\exp(aP - b)} + F_e \quad (4-5)$$

となるが, これはシグモイド形をあらわす式の一つである. (5)式をモデル式として非線形最小二乗回帰⁴⁾を行って a, b, F_e を求めた. 図 4-25(d)の例に示すように, 実測値と回帰式による推定値はよい一致(決定係数 $r^2 > 0.99$)を示した. そこで本研究では, (5)式による近似から組織内ガス体積を決定することとした. 但し図 4-25(d)中のリンゴの例のように, F_e が F_A より大きい場合は F_A と F_p の中間点を収束値 F_e としてガス体積を算出した. このようにして決定した組織内ガス体積が, 別途ピクノメータ法により測定した試料体積に占める割合をもって組織内ガス体積分率とした.

(5) 加圧下計測

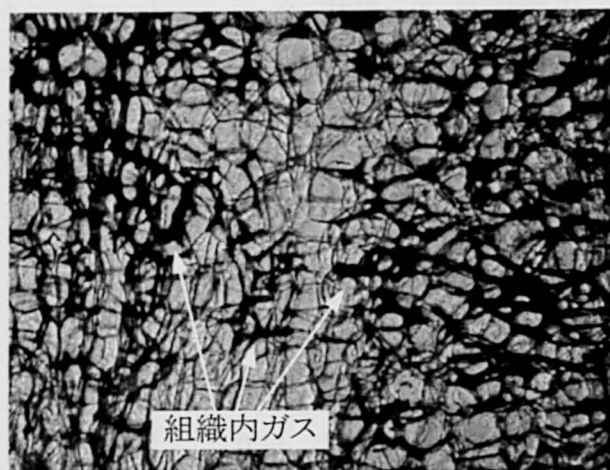
果肉中のガスがその超音波縦波音速に与える影響をみるためには, 同一種の農産物での計測データを多く取って, ガス分率ができるだけ広範囲にわたることが望ましい. 表 4-4に今回使用した果菜・根菜類組織のガス体積分率を示す. 種類が異なるとガス分率が変わるのはもちろんのこと, 同じ種類でもガス分率に分布があることがわかる. さらにこの分布幅を大きくするために, 前節の気泡分散寒天ゲルの実験と同様に, 加圧下での超音波縦波音

表 4-4 供試材料の組織内ガス体積分率

	標本数	ガス体積分率 [% (v/v)]		
		平均	最小	最大
ダイコン	51	3.36	1.27	7.38
サツマイモ	51	6.96	3.03	12.54
カボチャ	56	4.15	2.54	6.97
ナシ	10	2.58	1	6.88
リンゴ	69	19.13	13.34	23.9
トウガン	8	6.12	2.57	13.19
スイカ	10	2.94	2.26	3.75
ニンジン	6	0.67	0.34	1.3
パレイショ	10	0.6	0.4	0.84

速と準静的ヤング率の計測を行った。果菜・根菜類果肉の大部分は非圧縮性の水からなるため、雰囲気圧を上げれば圧縮性のガスの体積のみが減少するため、みかけのガス体積分率は減少する。こうすることで、同じ種類の試料でもガス体積分率の変動幅を大きくとることができ、ガスの影響の検討に有用なデータが得られると考えられる。

図 4-26 に大気圧下と加圧後に撮ったダイコン組織の顕微鏡写真を示す。細胞壁に沿うようにして見える黒い部分が組織内ガスであるが、加圧により消失していることが確認できる。しかし試料内の一部あるいはすべての細胞間隙が外部と通気しているような場合、雰囲気圧を上げても間隙内圧が増すだけで間隙体積が減少せず、ガス体積分率のコントロールができない可能性もある。これを確認するために、リンゴ果肉から試料切片を 2 枚切り出し、一方は封液に浸漬しながら、もう一方はそのままの状態、試料の加圧中の様子を顕微鏡で観察した(図 4-27)。封液がないと加圧しても間隙の大きさにほとんど変化がみられない。一方、封液中の試料は加圧すると間隙部分のガスがほぼ消失していることがわかる。よって加圧操作によってガス体積分率を確実にコントロールするために、試料を封液に浸漬しながら計測を行うこととした。封液と試料との間で水分の移動が発生しないように、試料の水ポテンシャルと等しい水ポテンシャルをもつ液体を封液として用いるのがよいが、調製に時間がかかるため、試料近傍の部位から搾汁した果汁を封液として代用することとした。果肉をミキサーで摩砕後、遠心分離(3000rpm, 1 分間)により不溶物を取り除き、さらにその上澄液を濾紙(ADVANTEC, No.2)を用いて濾過し、その濾液をガス体積分率、超音波縦波音速、準静的ヤング率計測時の封液とした。



500μm

大気圧下

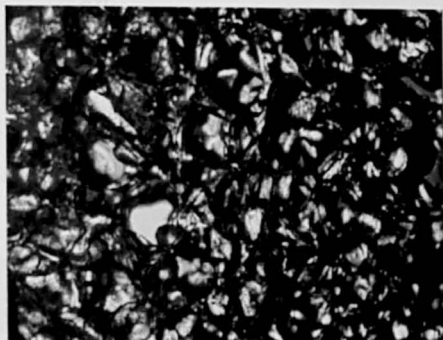


500μm

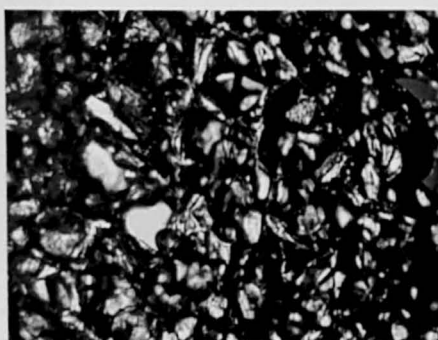
0.88MPa下

図 4-26 大気圧下及び加圧下におけるダイコン組織の実体顕微鏡写真

封液なし



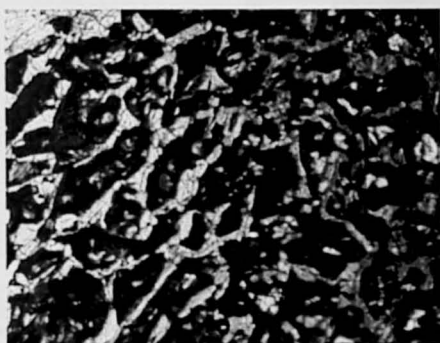
大気圧下



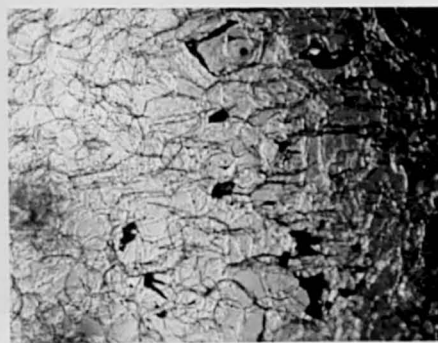
0.88MPa下

500μm

封液あり



大気圧下



0.88MPa下

500μm

図 4-27 大気圧下及び加圧下におけるリング組織の実体顕微鏡写真

図 4-28 に封液と試料をセットした超音波縦波音速・ヤング率計測部を図示する。ガス分率計に試料封入後、加圧操作を開始するまでに液位が著しく変動した場合は、封液—試料間で水分の移動があったと判断して試験を中止した。

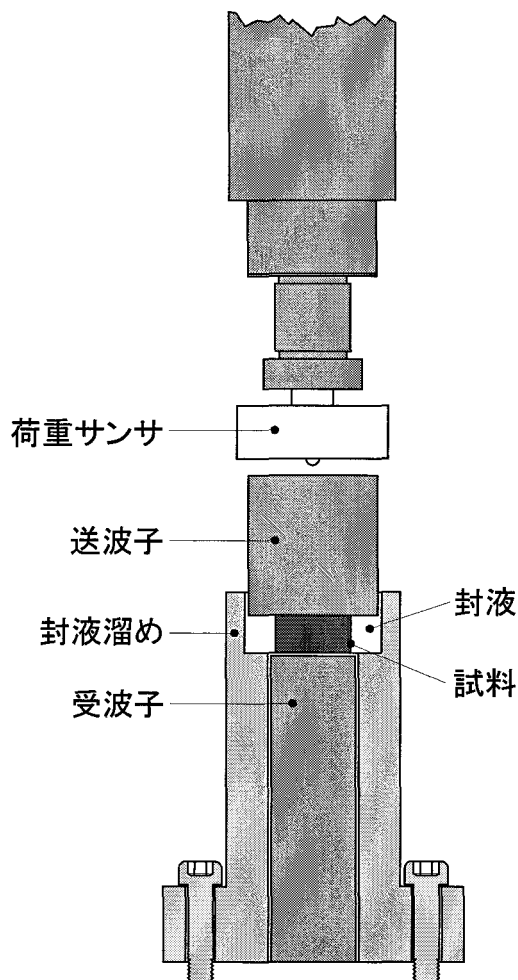


図 4-28 封液と試料のセット方法

(6) 実験手順

1 回の計測に必要な三つの試料が、計測中にどのように使用されるかという視点から、計測全体の流れをまとめたものを図 4-29 に示す。

同一の果実及び野菜より三つの試料(直径 10mm 厚さ 5mm)を切り出す。切除箇所は前節で示した通り。そして表面が乾かないように不透水製薄膜(パラフィルム)で密封しておく。試料を切り出した近傍の果肉をミキサーで摩砕後、遠心分離・濾過操作により不溶物を取り除いた果汁を準備する。一つの試料をピクノメータに入れ、置換媒体に蒸留水を用いた液

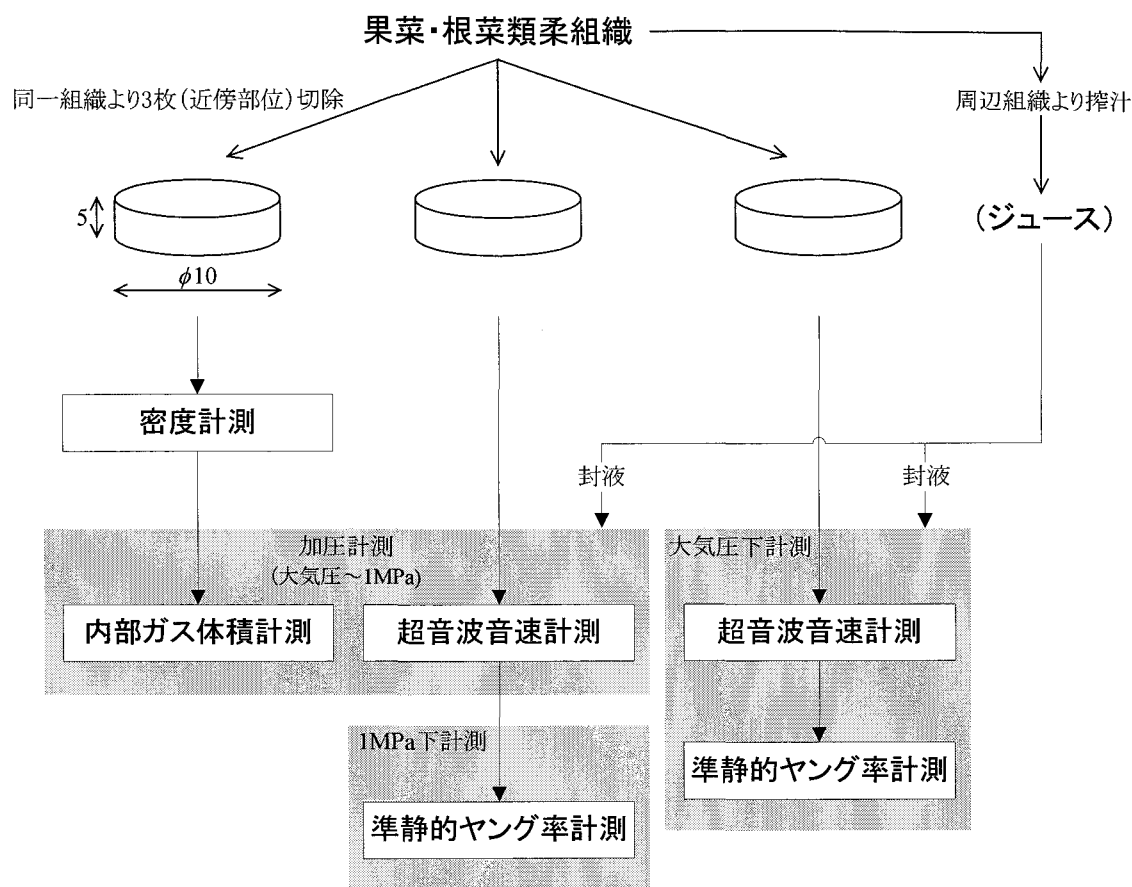


図 4-29 果菜・根菜類試料を用いた実験の流れ

体置換法により体積と密度の計測を行う。ピクノメータより試料を取り出し、余分の水をペーパー(キムワイプ)で大まかに取り除いた後、作製しておいた果汁を封液として、試料とともにガス体積計に入れて閉栓し、ガス体積計ごとガス体積分率計測用の圧力チャンバにセットする。残る2試料のうち1試料を超音波縦波音速計測部に果汁を適量注入した後、送受波子にはさみ、圧力チャンバの蓋を閉じる。その後、大気圧下で超音波縦波音速を計測した後、圧力チャンバ内の圧力をレギュレータで調節しながら音速の計測及びガス体積計の目盛りの読み取りを行う。大気圧から0.3MPaまでは0.025MPa刻みで、0.4MPaまでは0.05MPa刻みで、その後、1MPaまでは0.1MPa刻みで合計16ステップの加圧操作を行う。そして1MPaに達したら、音速、ガス体積測定の後、準静的ヤング率計測を行う。その後、除圧して、三つ目の試料を再び超音波縦波音速計測部にセットし、大気圧下で超音波縦波音速と準静的ヤング率の計測を行う。データはすべて制御用コンピュータに保存され、実験終了後に、ガス体積分率、超音波縦波音速、準静的ヤング率を算出する。

4.3.2. 結果及び考察

4.3.2.1. ガス体積分率・密度計測値のばらつき

加圧時のガス体積分率と超音波縦波音速，準静的ヤング率との間の関係を比較検討するためには同一圧力での計測値が必要となってくる．本実験では，ガス体積分率計測部と超音波縦波音速・準静的ヤング率計測部をガス管で連結してそれらを同時計測することとし，果肉中の近接する部位から切り出した 3 枚の試料を各計測に供した．その場合の試料間の密度及びガス体積分率計測値のばらつきを検討するために，果肉内の近接する部位から切除した 2 試料間の比(小さい値を基準とした)を試料の種類別にまとめた結果を表 4-5 に示す．

密度については，平均がほぼ 1，変動係数がおよそ 1.5%ほどで，今回の実験での密度計測値の変動範囲 $775 \sim 1110 \text{ kg/m}^3$ を考慮すると，近接箇所より取り出した 2 試料の密度はほぼ同じであると判断した．組織内ガス体積分率については，平均が約 1.2，変動係数が約 15%となり，密度よりもばらつく傾向にあった．しかし，今回用いた実験試料のガス体積分率の変動範囲 (0.4～23%(v/v)) に比して十分に小さいものと判断できる．但し，実験結果を試料の種類別に評価する場合には，この変動について十分考慮する必要がある．

表 4-5 果肉中の近接部位から切除した 2 試料の密度・ガス体積分率のばらつき

	標本数	近接する部位より取った 2 試料の計測値の比(小さい方の値を 1 とする)			
		密度		組織内ガス体積分率	
		平均 [—]	変動係数 [%]	平均[—]	変動係数[%]
ダイコン	25	1.010	0.80	1.343	19.0
サツマイモ	25	1.010	1.37	1.164	12.3
カボチャ	27	1.012	1.24	1.134	7.62
ナシ	5	1.004	0.26	1.193	13.5
リンゴ	25	1.023	1.81	1.170	12.8
トウガン	4	1.027	2.58	1.257	24.2
スイカ	5	1.004	0.41	1.198	10.2
ニンジン	3	1.003	0.22	1.556	20.1
バレイショ	5	1.005	0.46	1.174	8.64
全試料	124	1.014	1.48	1.208	15.6

4.3.2.2. 大気圧下実験

超音波縦波音速と準静的ヤング率の関係を図 4-30 に示す. 種類別にみた場合, サツマイモ, スイカ, バレイショを除いて, 相関係数 r が 0.5 を上回り, 正の相関がみられた. また全試料でも相関係数 r は 0.36 となり, 果菜・根菜類全体で超音波縦波音速と準静的ヤング率には弱い正の相関があると言える.

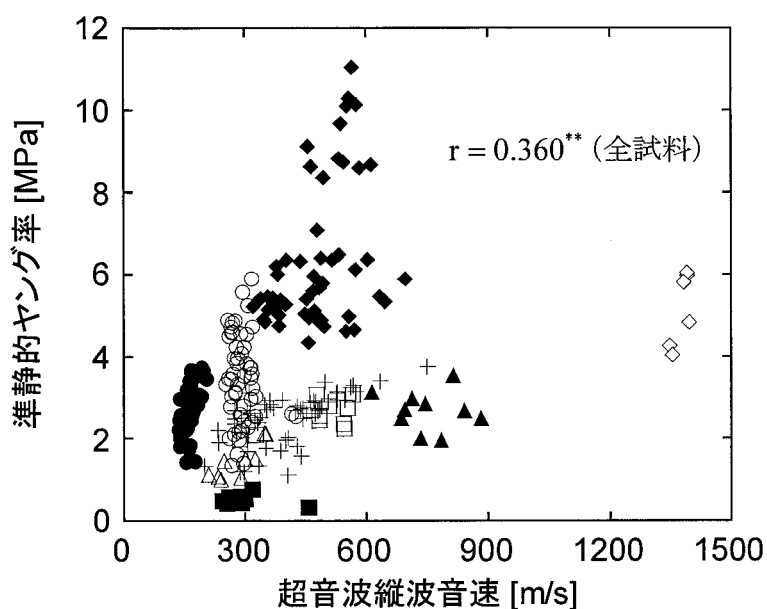


図 4-30 果菜・根菜類試料の準静的ヤング率と超音波縦波音速

● リンゴ	$r = 0.567^{**}$	△ トウガン	$r = 0.829^{**}$
◆ カボチャ	$r = 0.414$	□ ナシ	$r = 0.647^{*}$
○ サツマイモ	$r = -0.124$	◇ ニンジン	$r = 0.787^{*}$
■ スイカ	$r = -0.359$	▲ バレイショ	$r = -0.132$
+ ダイコン	$r = 0.620^{**}$		

(** : 1%水準で有意 * : 5%水準で有意)

組織内ガス体積分率と超音波縦波音速の関係を図 4-31 に示す。ガス体積分率が減少するに従って、超音波縦波音速が増加した。図中の実線は(3-14)式で表される気泡分散系理論式を元に全試料のデータを用いて非線形回帰を行った結果を示す。計測値が理論曲線に沿って変化していく傾向にあり、このことは前章の(3-14)式及び気泡分散寒天ゲルの実験結果(図 4-18)の傾向と一致した。この近似式より得られる、連続相、すなわち組織内ガスを除く細胞実質部の体積弾性率 K_1 、密度 ρ_1 、ポアソン比 ν_1 はそれぞれ 1.9207GPa, 999.97kg/m³, 0.49872 となった。細胞実質部のほとんどは水からなることから、その物性値も水のそれに近いと予想されるが、これら近似式より推定した値は、水の値(体積弾性率 K =約 2.22GPa, 密度 ρ =約 1000kg/m³, ポアソン比 ν =約 0.5)に近いことから、この理論式の果菜・根菜類柔組織への適用も妥当なものと考えられる。

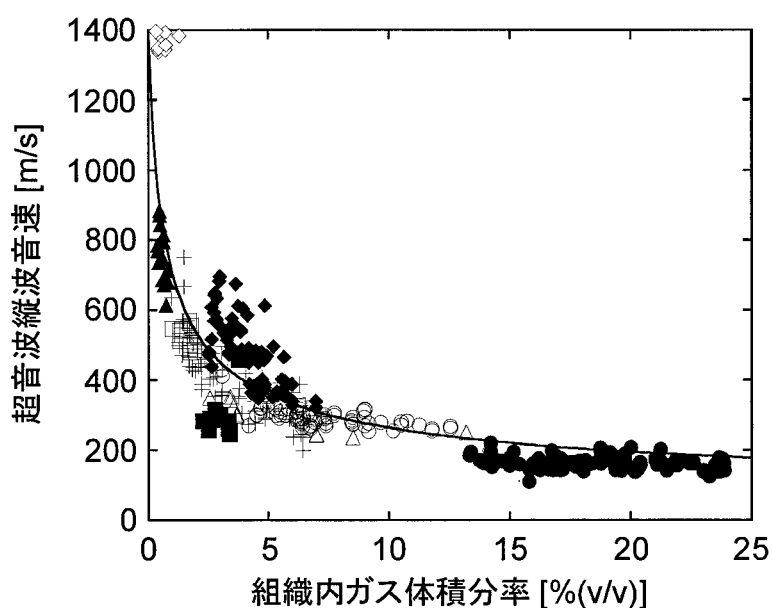


図 4-31 果菜・根菜類試料の超音波縦波音速と組織内ガス体積分率

- | | |
|---------|---------|
| ● リンゴ | △ トウガン |
| ◆ カボチャ | □ ナシ |
| ○ サツマイモ | ◇ ニンジン |
| ■ スイカ | ▲ バレイショ |
| + ダイコン | |

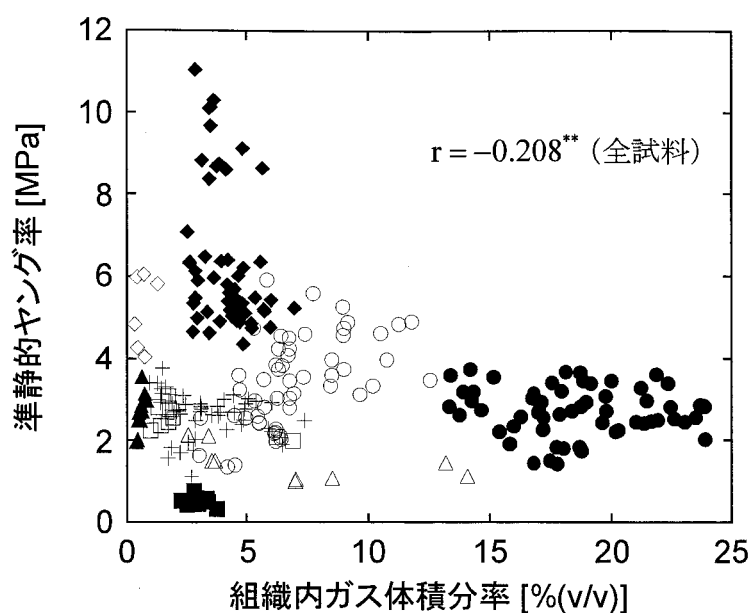


図 4-32 果菜・根菜類試料の準静的ヤング率と組織内ガス体積分率

● リンゴ	$r = -0.073$	△ トウガン	$r = -0.575$
◆ カボチャ	$r = -0.321^*$	□ ナシ	$r = -0.647^*$
○ サツマイモ	$r = 0.528^{**}$	◇ ニンジン	$r = 0.283$
■ スイカ	$r = -0.331$	▲ バレイショ	$r = 0.768^{**}$
+ ダイコン	$r = -0.224$		

(** : 1%水準で有意 * : 5%水準で有意)

組織内ガス体積分率と準静的ヤング率の関係を図 4-32 に示す. 全試料でみた場合, 組織内ガス体積分率が大きくなると準静的ヤング率は小さくなる傾向 ($r = -0.208$) があるが, 試料別にみると, 同様に負の相関を示すのはカボチャとナシのみであり, それ以外は正の相関を示すか, 有意な相関がみられなかった.

4.3.2.3. 加圧下実験

ガス体積分率が弾性率や音速に及ぼす影響を検討する場合, 試料のガス体積分率が広く分散している方がその影響についての検出力が増す. しかし, 表 4-4 に示すように試料の種類によりガス体積分率の大きさは異なり, またその分布もある程度の範囲に限られる. 従って, ガス体積分率と弾性率・超音波縦波音速の間に相関がなくとも, 各々がある特定の分布をしていれば両者に擬似相関⁶⁾が発生することになり, これをガス体積分率の影響であると誤判断してしまう可能性がある. 加圧計測は同一試料のガス体積分率を人為的に変化させることができるため, この種の誤判断をある程度回避でき, 因果関係を推測するためには有効な手段であると考えられる.

大気圧下と加圧 (約 1MPa) 下で計測した時の超音波縦波音速と準静的ヤング率の関係を図 4-33 に示す. 図 4-30 の結果と異なり, その相関係数 r が 0.058 (非有意) であることが

ら、両者に有意な相関を見出すことはできなかった。また試料の種類別にみても、リンゴを除き有意な相関をみいだすことはできなかった。加圧下(図中の大きいプロット点)では、組織内ガスが大気圧下と比較して減少しているため音速は増加するものの、準静的ヤング率はほとんど変化していないため、図に示すように、大気圧下のプロットがそのまま水の音速(約1480m/s 20℃時)の方に移動している。従って、雰囲気気圧が1MPaに至るまでの超音波縦波音速の経緯を図中にプロットしたとすれば、大気圧下と加圧下のデータ点を結ぶ直線状(図4-33中の矢印)に集まるため、さらに相関係数は下がると考えられる。リンゴについては、今回の試料の中でガス体積分率が最も高く、1MPaの加圧下でも他試料と比較してまだ多くのガスが試料中に残されており、縦波音速が水の音速にまで達しなかった。もし、さらに加圧してガス体積分率を減ずることができれば、水の音速付近にまで近づき、縦波音速と準静的ヤング率の相関は低下すると予想される。

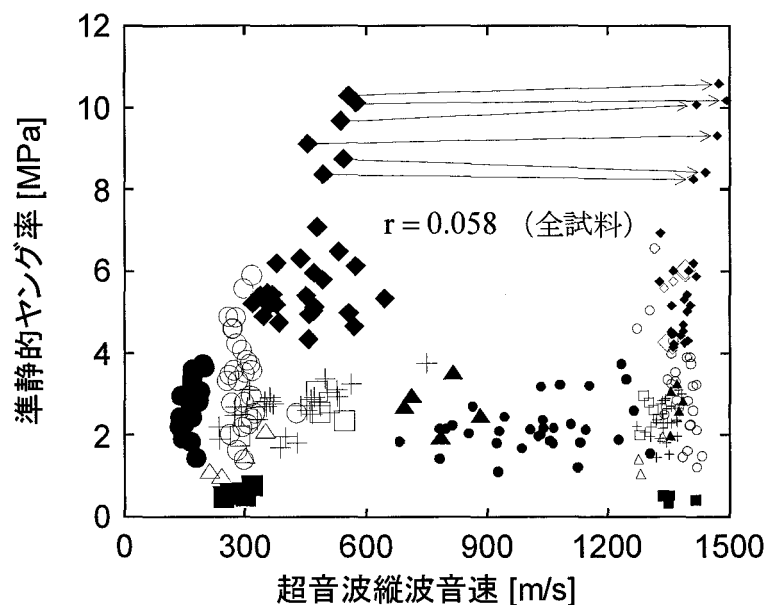


図 4-33 大気圧下及び加圧下の果菜・根菜類試料の準静的ヤング率と超音波縦波音速

プロット大 : 大気圧下		プロット小 : 1MPa 下	
● リンゴ	$r = 0.342^{**}$	△ トウガン	$r = 0.125$
◆ カボチャ	$r = -0.014$	□ ナシ	$r = 0.074$
○ サツマイモ	$r = 0.130$	◇ ニンジン	$r = 0.535$
■ スイカ	$r = 0.567$	▲ バレイショ	$r = -0.0003$
+ ダイコン	$r = 0.254$		

** : 1%水準で有意 * : 5%水準で有意

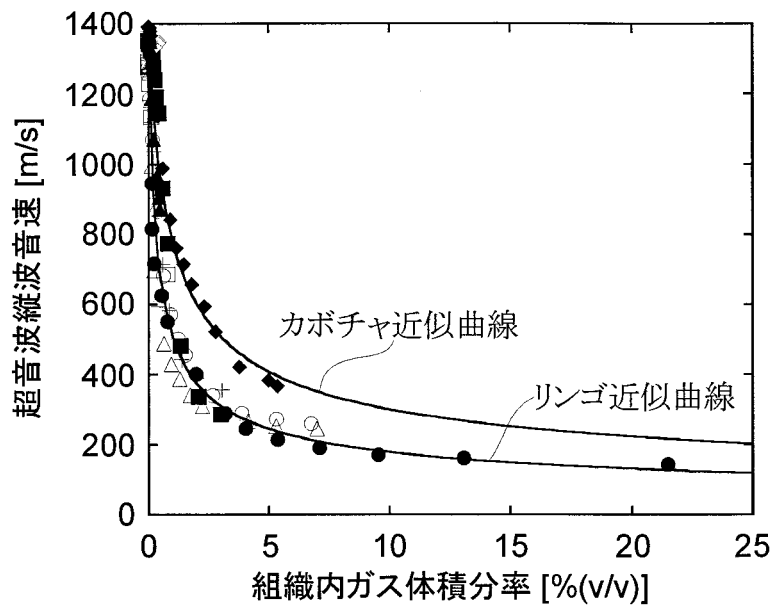
表 4-6 加圧操作が準静的ヤング率及び組織内ガス体積分率に与える影響

	標本数	準静的ヤング率の大気圧時の値 に対する 1MPa 時の値の比		近接する部位より取った 2 試料の ガス体積分率の比 [*] (小さい方の値を 1 とする)	
		平均 [—]	変動係数 [%]	平均[—]	変動係数[%]
ダイコン	25	0.884	8.39	1.056	6.01
サツマイモ	25	0.929	16.8	1.11	10.2
カボチャ	27	0.958	8.01	1.05	4.75
ナシ	5	1.002	2.23	1.031	2.1
リンゴ	25	0.826	15.6	1.105	7.02
トウガン	4	0.933	10.3	1.026	2.33
スイカ	5	0.808	19.9	1.334	25.1
ニンジン	3	0.948	2.26	1.11	9.77
パレイショ	5	1.008	5.37	1.076	3.76
全試料	124	0.907	13.4	1.087	10.2

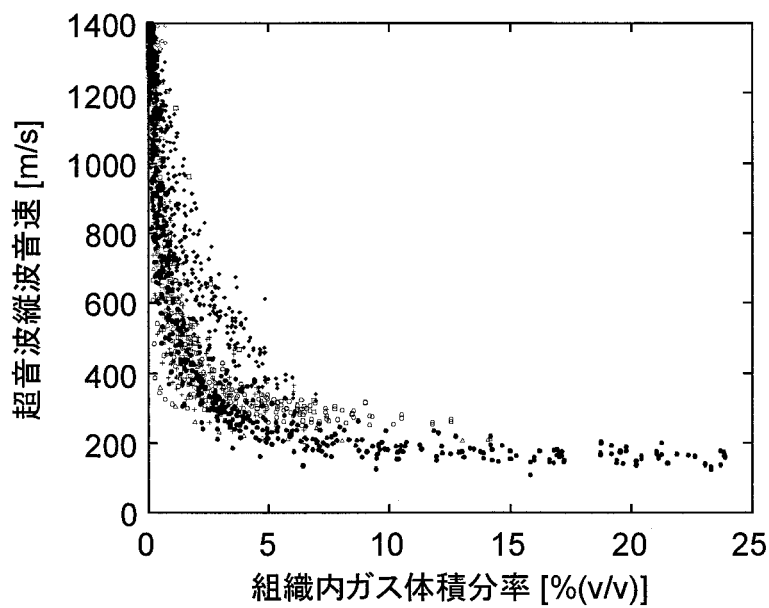
* : 2 試料ともに大気圧下で計測した。

大気圧時の準静的ヤング率に対する加圧時の準静的ヤング率の比についてまとめた結果を表 4-6 に示す。おおむね 1 に近いが、全試料を平均するとおおよそ 10% ほど加圧操作により準静的ヤング率が減少する傾向にあった。しかし、近接する部位より取った 2 試料の大気圧下での準静的ヤング率の比やその変動係数と比較して著しい減少は示しておらず、また、加圧による音速の変動が大気圧下での音速の変動幅の数倍以上であることから、縦波音速に及ぼすヤング率の影響は加圧による影響よりも小さいといえる。

加圧しながら同一試料の超音波縦波音速の変化を計測したときの結果を図 4-34(a) に示す。加圧による組織内ガス体積分率の減少に伴い、超音波縦波音速が徐々に増加していき、ガス体積分率が零に近づくと水の音速 (約 1483m/s 20℃時) 近くの値に収束していく様子が示される。またこのときの音速の増加は図 4-31 の理論曲線とほぼ同じ傾向をもつ。試料の種類別にみると、曲線の形状及びガス体積分率が 0%(v/v) の場合、音速の収束値はほぼ同じであるが、まったく一致するとはいえない。これはガス領域を除く細胞実質部の持つ弾性率の違いが反映されるものと考えられる。例えば、図中で音速の最も遅いリンゴと、最も速いカボチャのデータについて理論近似式から得られた連続相 (細胞実質部) の体積弾性率 K_1 及びポアソン比 ν_1 を用いてヤング率 E_1 を、等方均一媒体の各種弾性率間の関係式 $E = 3(1 - 2\nu)K$ より算出すると、カボチャのヤング率はリンゴのヤング率の約 3 倍となるが、これは準静的ヤング率の実測データでもカボチャはリンゴの約 2.2 倍となる事実と符合する。



(a) 果菜・根菜類種別の代表的データのプロット



(b) 果菜・根菜類全試料のプロット

図 4-34 大気圧下及び加圧下の果菜類試料の組織内ガス体積分率と超音波縦波音速

- | | |
|---------|---------|
| ● リンゴ | △ トウガン |
| ◆ カボチャ | □ ナシ |
| ○ サツマイモ | ◇ ニンジン |
| ■ スイカ | ▲ パレイショ |
| ＋ ダイコン | |

それにもかかわらず、図 4-33 で示されるようにヤング率と超音波縦波音速に相関がほとんどみられないのは、組織内ガスが超音波縦波音速に与える影響がヤング率の寄与よりも大きいためである。図 4-34(b)に全試料の加圧時の超音波縦波音速変化を組織内ガス体積分率の関係を元にプロットした結果を示す。ガス体積分率が減少するに従って、理論曲線とほぼ同様の傾向で超音波縦波音速が増加していくことがわかる。このことは図 4-31 に示すように、超音波縦波音速に関してガス体積分率の寄与が支配的であることを示唆する。

大気圧下と加圧(約 1MPa)下で計測した時の組織内ガス体積分率と準静的ヤング率の関係を図 4-35 に示す。1MPa 下では前述のようにガス体積分率がほとんど零に近くなるため、加圧下のプロットは大気圧下のヤング率のプロットがそのまま 0%(v/v)の方へ移動したような形となった。図 4-32 に示すように大気圧下ではガス体積分率と準静的ヤング率に負の弱い相関を見出せた。加圧データを付加した場合、ガス体積分率が最大約二十数%(v/v)の変動をしてもヤング率にほとんど変化がなく、全試料に関して相関係数は-0.046となり、種類別にみてもリンゴを除き、ガス体積分率と準静的ヤング率には有意な相関はみられなかった。従って、準静的ヤング率に及ぼすガス体積分率の寄与はほとんどないと言える。

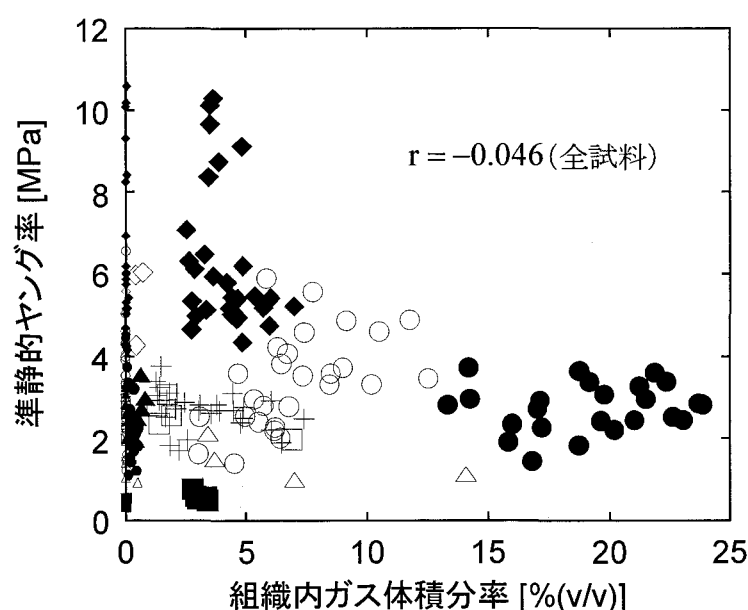


図 4-35 大気圧下及び加圧下の果菜・根菜類試料の準静的ヤング率と組織内ガス体積分率

プロット大：大気圧下		プロット小：1MPa 下	
● リンゴ	$r = 0.422^{**}$	△ トウガン	$r = -0.233$
◆ カボチャ	$r = -0.019$	□ ナシ	$r = -0.417$
○ サツマイモ	$r = 0.239$	◇ ニンジン	$r = 0.28$
■ スイカ	$r = 0.524$	▲ パレイシヨ	$r = 0.185$
+ ダイコン	$r = 0.138$		

** : 1%水準で有意

* : 5%水準で有意

4.3.2.4. 密度と組織内ガス体積分率

図 4-36 に試料密度と組織内ガス体積分率の関係を示す。両者には負の相関(相関係数 $r = -0.891$)が見られた。果肉組織をガスと細胞実質部の2相系であると考えた場合、加成則により密度はガス体積分率に比例する。高含水率果菜・根菜類の組織細胞はそのほとんどが液胞からできているため、細胞実質部の密度は種類によらず水の密度程度の大きさである。図 4-36 の関係がほぼ線形であるのはこのためである。また、同じガス体積分率であっても、サツマイモとカボチャは密度が他試料よりも大きい傾向が見られるが、これはサツマイモやカボチャは糖質、特にデンプンが他種と比較して多く⁷⁾、またデンプン粒の密度が水よりも大きいいため細胞実質部の密度が他試料よりも大きくなることに起因するものと考えられる。今回用いた試料の中でデンプン含量の多い、サツマイモ(デンプン含量約 26%⁷⁾)、カボチャ(同 4~9%⁷⁾)、バレイショ(同 15%⁷⁾)を除くと、試料の密度—組織内ガス体積分率の線形関係はさらにまとまりがよくなる(相関係数 $r = -0.981$)。

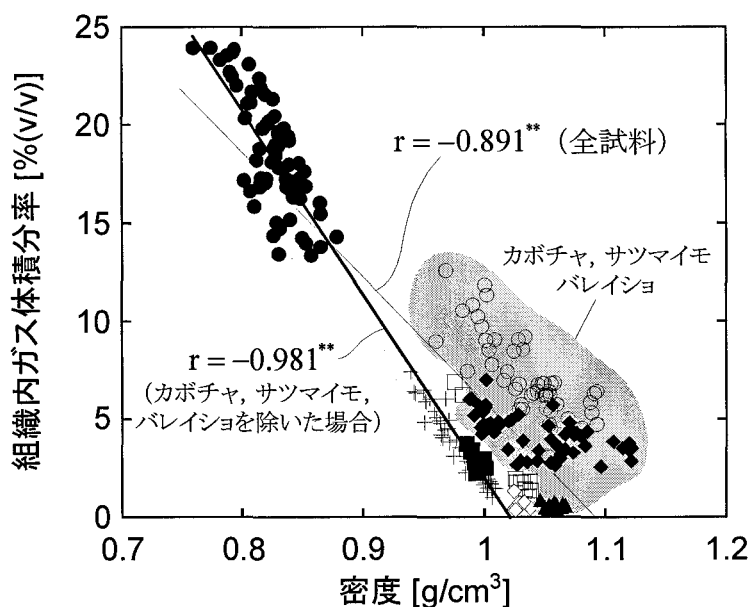


図 4-36 果菜・根菜類の組織内ガス体積分率と密度

- | | |
|---------|---------|
| ● リンゴ | △ トウガン |
| ◆ カボチャ | □ ナシ |
| ○ サツマイモ | ◇ ニンジン |
| ■ スイカ | ▲ バレイショ |
| + ダイコン | |

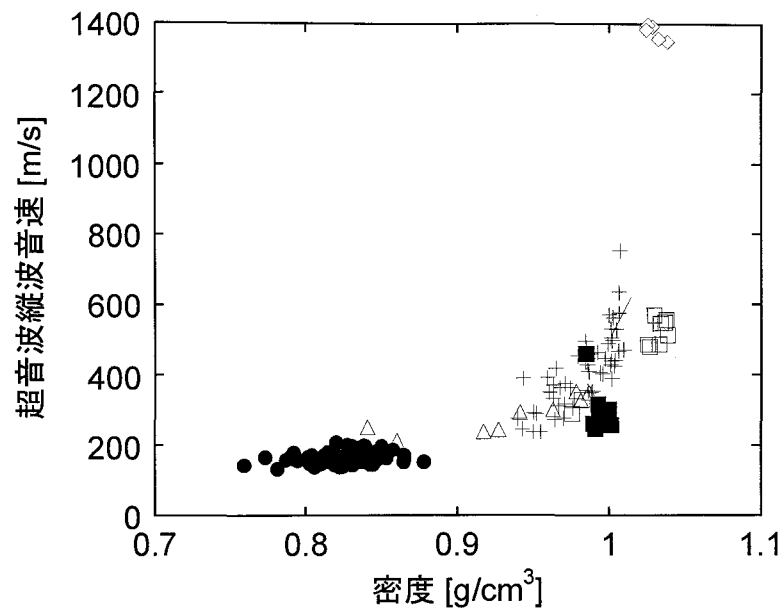


図 4-37 果菜・根菜類の超音波縦波音速と密度(カボチャ・サツマイモ・バレイショを除く)

- | | |
|-------|--------|
| ● リンゴ | △ トウガン |
| □ ナシ | ◇ ニンジン |
| ■ スイカ | + ダイコン |

密度と組織内ガス体積分率に負の相関があるということは、超音波縦波音速と組織内ガス体積分率の間の関係を超音波縦波音速と密度の関係に置き換えることができるということを示唆する。図 4-37 にデンプン質試料であるサツマイモ、カボチャ、バレイショを除くすべての試料の超音波縦波音速と密度の関係を示す。密度が増すと超音波縦波音速も増加していることが確認できる。無限媒体中の縦波音速の理論式 について、密度 ρ 以外のパラメータを固定して考えてみた場合、密度が増せば縦波音速は減少することになり、図 4-37 の結果と一見相反する。密度が増すということは、組織内のガス含有量が減るということであり、このことは、体積弾性率は逆に高くなるということを意味する。密度の場合、図 4-36 に示す範囲で考えてもたかだか 1.5 倍程度の増加にしかならないのに対して、体積弾性率はそれ以上増加しているということになる。

このことを確かめるために、加圧による試料体積の減少量から推定した等温体積弾性率とガス体積分率の関係を求めてみたところ(図 4-38)、等温体積弾性率には約 100 倍近い差が生じた。従って、高含水率果菜・根菜類組織の場合、縦波音速理論式中の密度項の寄与は体積弾性率よりも小さく、ほとんどの場合が無視し得る。図 4-37 の関係はあくまで組織内ガス体積分率と密度の加成性による間接的な相関が縦波音速との間で成立したとみることができる。

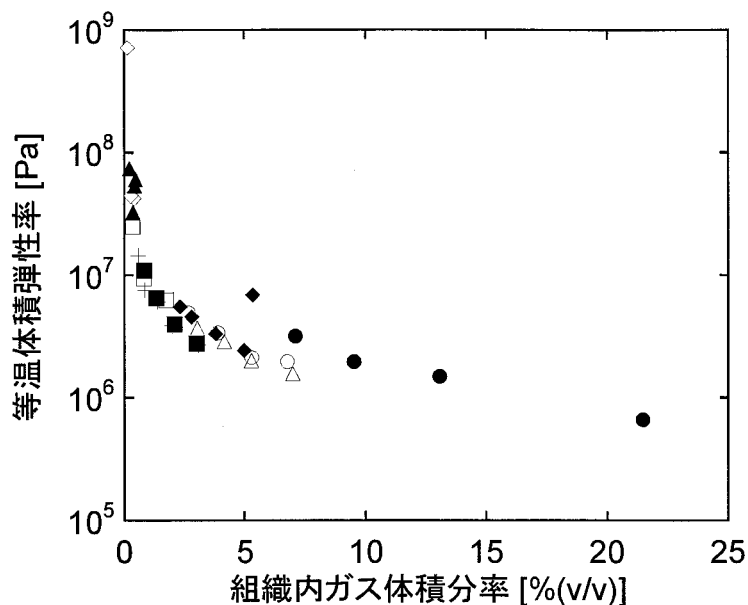


図 4-38 果菜・根菜類試料の等温体積弾性率と組織内ガス体積分率

- | | |
|---------|---------|
| ● リンゴ | △ トウガン |
| ◆ カボチャ | □ ナシ |
| ○ サツマイモ | ◇ ニンジン |
| ■ スイカ | ▲ パレイショ |
| ＋ ダイコン | |

4.3.2.5. 気泡分散系理論の適用性

以上のことから、果菜・根菜類組織についても前章の理論及び気泡分散寒天ゲルを用いた実験結果より得られた知見と同様の結果を得たと言える。すなわち、果菜・根菜類柔組織の超音波縦波音速はヤング率の影響よりも体積弾性率の影響をより多く受け、その体積弾性率が組織内のガス含有量に大きく依存することにより、ガス体積分率によってその値は200m/s 弱から水の音速に近い約 1400m/s まで変動し、またその変動曲線は理論式にほぼ従うことが明らかとなった。また密度とガス体積分率には負の相関があり、特に非デンプン質の果菜・根菜類では線形関係が成り立ち、ゆえに超音波縦波音速と密度にも一定の関係があることを明らかにした。従って、高含水率果菜・根菜類の超音波縦波音速から、組織内ガス体積分率、あるいは密度を推定できる可能性があると言える。

第4節 まとめ

果菜・根菜類組織中のガス体積分率と音速・弾性特性に関する気泡分散系理論の適用性について、カボチャ、ダイコン、サツマイモ、ナシ、リンゴ、トウガン、スイカ、ニンジン、バレイショを用いて実験的な検討を行い、以下の知見を得た。

- 1) 果菜・根菜類組織の超音波縦波音速は組織内ガス体積分率が大きくなるにつれて減少した。また気泡分散系理論式で近似することができた。
- 2) 超音波縦波音速と準静的ヤング率の間には相関は見出せなかった。但し、ガス体積分率がほぼ同じであればヤング率が高いほど超音波縦波音速も高い傾向があった。
- 3) 加圧操作により、試料の弾性特性を変えることなく組織内ガス体積分率を減少させることができた。またこの加圧操作で超音波縦波音速は増加し、ガス分率が零に近づくと約 1400m/s の値に近づいた。一方、1MPa 下の準静的ヤング率は、大気圧下のヤング率よりも平均約 10%ほど小さくなったが、超音波縦波音速への影響を見出すことはできなかった。
- 4) 超音波縦波音速の組織内ガス体積分率依存性、超音波縦波音速と準静的ヤング率の関係、及び細胞実質部の音速と水の音速の関係について、気泡分散系理論で十分説明できることが明らかとなった。
- 5) 組織内ガス体積分率と密度には負の相関があり、カボチャ、サツマイモ、バレイショを除く非デンプン質試料では高い相関($r = -0.981$)を持つ線形関係がみられた。
- 6) 高含水率果菜・根菜類の超音波縦波音速から組織内ガス体積及び密度の推定ができる可能性があることを明らかにした。

参考文献

- 1) Nakayama, T., Kimata, T. and A. Ooi : Development of plastic consistency in air-dispersed gel, Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology, 39(1), pp.93-101 (1992)
- 2) Sakiyama, R. : Estimation of the pressure and volume of gas in plant tissues using a pressure chamber, Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 53(4), pp.453-458 (1985)
- 3) 実吉純一, 菊池喜充, 能本乙彦 : 超音波技術便覧, 日刊工業新聞社, pp.1329 (1991)
- 4) Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W.T. and B. P. Flannery: NUMERICAL RECIPES in C[日本語版], 技術評論社, pp.503-510 (1993)
- 5) 中川鶴太郎 : レオロジー, 岩波全書, pp.23-29 (1978)
- 6) 永田 靖 : 統計的方法のしくみ, 日科技連出版社, pp.131-135 (1996)
- 7) 高宮和彦 編 : 野菜の科学, 朝倉書店, pp.48-51 (1993)

第5章 バイモルフ型振動子による低周波振動実験

第1節 はじめに

前章では、気泡を分散させた寒天ゲルと果菜類柔組織を用いた超音波計測を行い、無限媒体近似を用いた分散系理論に基づいて、ガス体積分率がみかけのヤング率や縦波音速に及ぼす影響に関する実験的検討を行った。本章では、超音波計測とともに農産物の音響計測でこれまで数多くの研究が行われてきた衝撃振動試験、いわゆる打音法について、分散系理論を中心に実験的検討を行う。

これまで果菜類の打音法の研究では、果実の衝撃応答のピーク周波数が、果肉の軟化に従って低周波数側へシフトすることから、これを硬さの指標として用いることが検討されてきた¹⁾⁻³⁾。また、球体果を完全弾性球体とみなしたときの各振動モードの固有振動数と弾性率、密度との関係を理論的に導き、実測データとの照合や弾性率の推定が行われてきた⁴⁾⁻⁶⁾。

杉山はメロンの赤道外周表面上を伝播する衝撃波動の計測を行い、ピーク周波数と伝播速度のもつ等価性について報告を行っている⁷⁾⁻¹²⁾。果実表面部分の張力を復元力とする振動の伝播速度が、軟化にともなう張力低下により減少し、それが固有振動数の低下を引き起こすとした。従って、同じ伝播速度でも、対象物のサイズが異なると固有振動数が変動するため、衝撃応答の周波数解析法では重量やサイズの計測が別途必要となってくるが、この点、伝播速度は対象物の大きさに影響を受けず、直接的な硬さ評価指標になり得るとしている。また実験結果からも、伝播速度と果肉貫入抵抗、みかけの弾性率に高い相関(相関係数 0.87~0.94)を得ている⁹⁾。

前章の結果から、果菜類柔組織中の縦波超音波の伝播を考えた場合、縦波振動は無限媒体中を伝播するという近似が成立する。この場合、縦波振動の進行方向に直角の向きに伸び縮みすることが許されない¹³⁾ため、波動の伝播速度 c_l は、

$$c_l = \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(K + \frac{4}{3} G \right)}$$

(但し、 c_l :縦波音速、 ρ :密度、 K :体積弾性率、 G :剛性率)であらわされ、体積弾性率と剛性率によって決定される。果菜類組織の成分のほとんどが水からなることから、体積弾性率は水のそれに近く、また剛性率やヤング率よりもはるかに大きいため、縦波音速は事実上体積弾性率支配となる。一方、農産物のいわゆる打音法では超音波領域の振動を励起することが困難であると考えられるため、波長の試料サイズに対する大きさは超音波よりも大きくなり、無限媒体近似が成立しがたくなってくる。有限媒体では、無限媒体近似で許されなかったいわゆる横縮みが許されるようになる。たとえば等方均一な弾性体棒に沿った縦振動速度 c_b は $c_b = \sqrt{E/\rho}$ (E :ヤング率)となり、弾性率としてはヤング率のみに依存し、無限媒体中の伝播速度とは異なる値をもつと考えられる。

本章では、バイモルフ振動子により試料に衝撃振動を与え、そのときの振動伝播速度を

計測し、試料の準静的ヤング率及び内部ガス体積分率が伝播速度に及ぼす影響について実験的に検討した結果について述べる。

第2節 バイモルフ型振動子による振動励起

5.2.1. バイモルフ型振動子

図 5-1 にバイモルフ型振動子の構造を示す。薄い板状の圧電素子を 2 枚接合し、電圧をかけると一方の圧電素子は伸び、他方は縮むため、全体として大きな屈曲変位が起こる。これに正弦波信号を印加することで、バイモルフ型振動子の先端部は図中に示すような振動を行う。変位量制御のしやすさから主として電子精密機器の可動部に用いられることが多い。またその振動方向から試料への横波やレイリー波の励起、あるいはその検出に用いられることもある。例えば、木村らは海底堆積物の物性計測を目的に、一組のバイモルフ型振動子を対向して配置し、その間に砂を置いて砂中の横波音速の計測を行った¹⁴⁾。また崔はバイモルフ型振動子の先端を濃度 5% のゼラチンゲルに接触させ、250Hz、4 波のバースト信号を入力し、ゲル表面上に表面波を励起させた。そして光てこを利用した振動検出を行って伝播時間を決定し、伝播速度約 1m/s 前後の計測結果を得た¹⁵⁾。

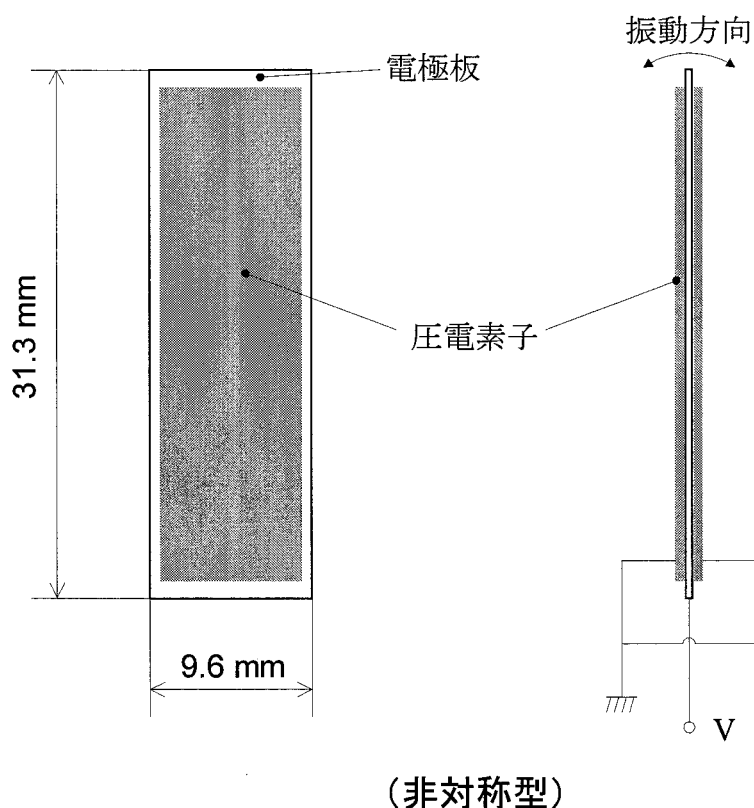


図 5-1 バイモルフ型振動子の構造

5.2.2. バイモルフ型振動子を用いた計測

バイモルフ型振動子(村田製作所製, PKF01A3, 変位 $250\text{ }\mu\text{m}/80\text{V}$)を図 5-2 のように保持したものを試作した. この振動子先端を直径 8mm の木製棒で軽く打撃したときの応答波形を図 5-3(a)に示す. この波形のパワースペクトル(図 5-3(b))から, 約 500Hz 近傍に卓越した共振点があり, それを境に周波数が高くなるほどパワーレベルが低くなっていくことが確認できた. また直径 3mm のステンレス棒で打撃した場合も同様の傾向にあった. 従って, この振動子を受波子として用いた場合, 約 500Hz を中心とした低周波振動に特に感度がよいと考えられる.

ほぼ球体に近い聖護院ダイコン(直径約 160mm)の赤道部表面に二つの振動子を接触配置し, 一方の振動子に 1000Hz の正弦半波信号を入力し, 他方の振動子でその応答を計測した. 図 5-4 にその計測波形を示す. 送波子への印加時点から遅れて信号を受信していることがわかる. また送受波子間の距離が長くなると, 初動時間も長くなっている. このことから, 送波子によって励起された振動がダイコンを経て受波子まで伝播したと考えられる.

振動には大きく分けて縦波と横波の二種類のモードがある. このセンサの振動方向から, ダイコン内部を伝播する実体波としての横波の発生・伝播が期待されるが, 一般に生体組織では媒質中の横波吸収が非常に大きく, 実体波としてはせいぜい数波長程度しか伝播しないとされており¹⁵⁾¹⁶⁾, 果菜類についても, 成分のほとんどが剛性率が零の水から構成されていることから, この振動モードが横波であるとは考えにくい. この振動子を数 kHz 以下のバースト信号で駆動した場合, 試料サイズに比して波長の小さな超音波振動は励起されないと考えられることから, バイモルフ型振動子で試料を加振し, その振動応答を計測する一種の打音法と考えることができる.

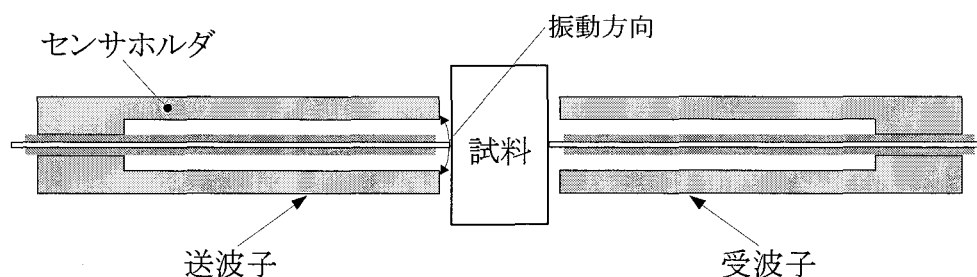
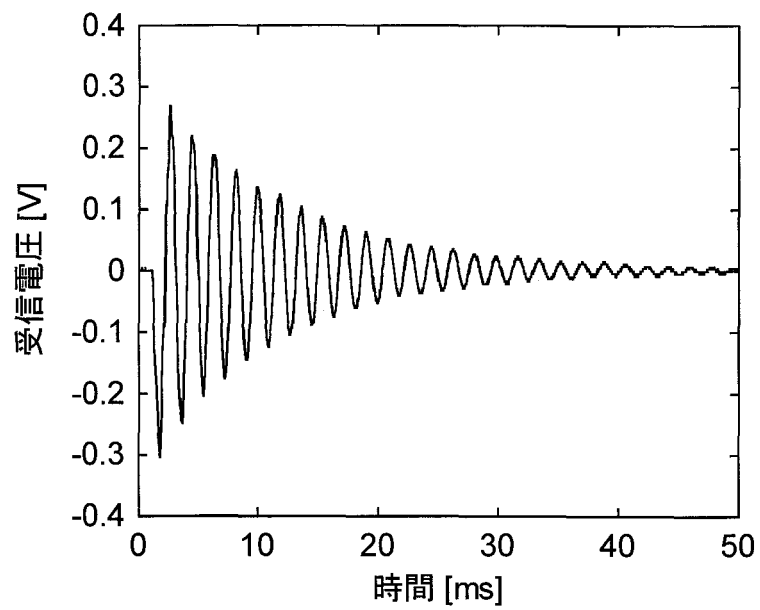
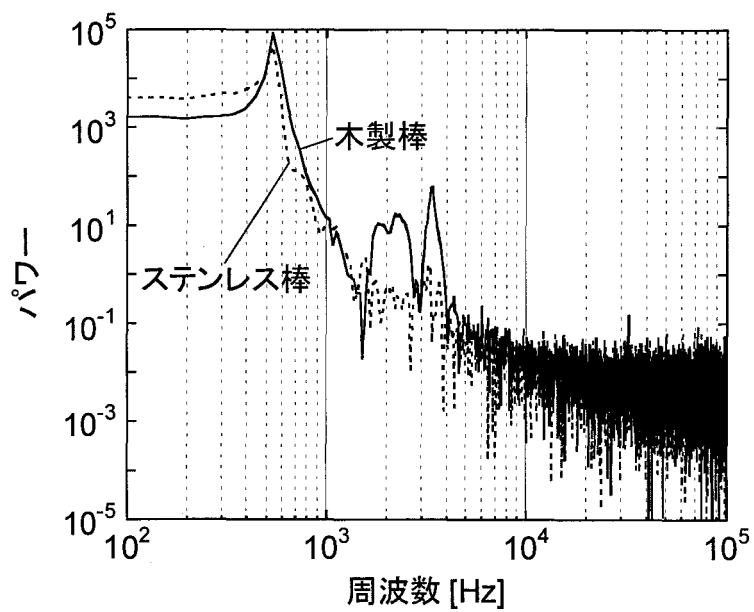


図 5-2 センサホルダ及び試料のセット方法



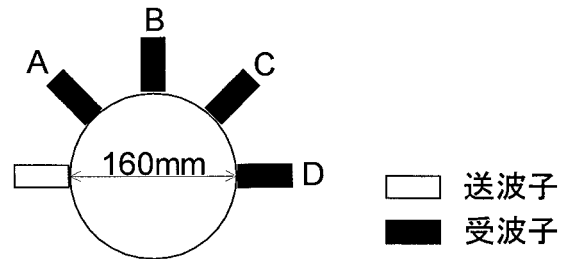
(a) 木製棒(φ 8mm)によるセンサ打撃時の応答波形



(b) 木製棒・ステンレス棒(φ 3mm)によるセンサ打撃応答波形のパワースペクトル

図 5-3 バイモルフ型振動子の共振特性

送受波子の取付位置



(聖護院ダイコン赤道断面)

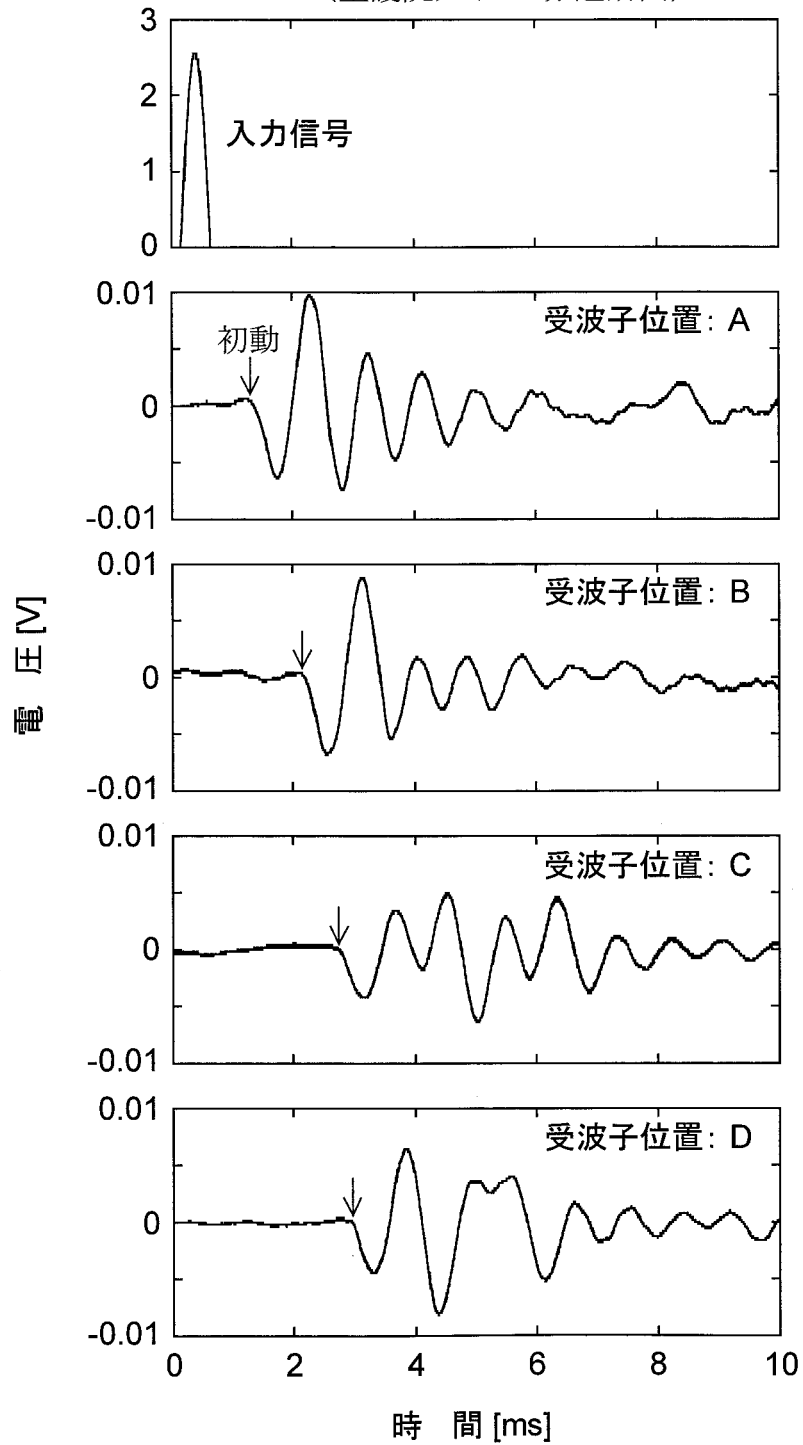


図 5-4 球状ダイコン(聖護院)の振動波形

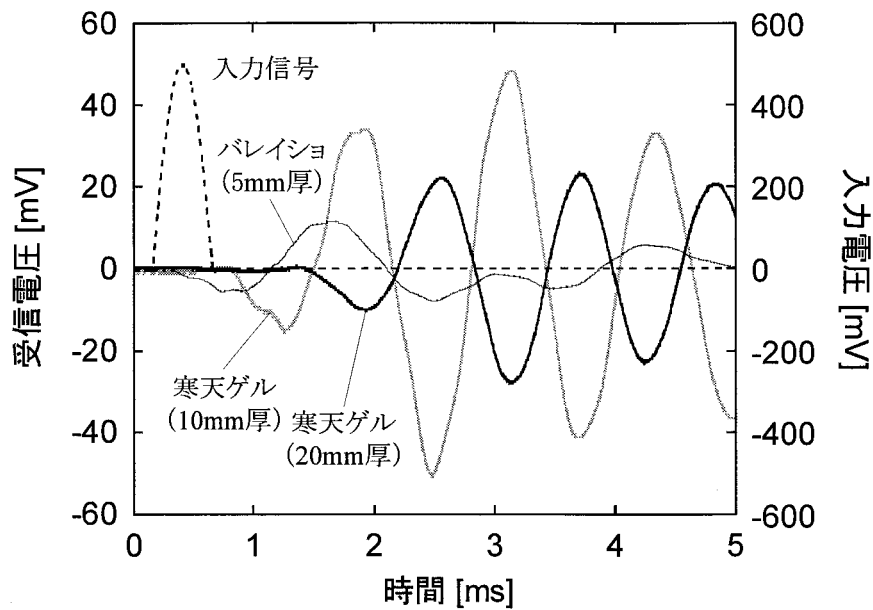


図 5-5 寒天ゲルとバレイショの振動波形

試料径: 38mm 寒天濃度: 5.66%(w/w)

寒天ゲルとバレイショの中心部から切り出した試料についての計測波形例を図 5-5 に示す。印加信号を 1000Hz の正弦半波とし、試料は径 38mm、厚みを 5～20mm のディスク状とした。聖護院ダイコンの計測結果と同様、小試料片でも、振動の励起とそれにとまう伝播波を検出することができた。

次に、寒天ゲル、バレイショ、カボチャ、及びダイコン試料の厚みを変えて伝播時間を計測した結果を図 5-6 に示す。いずれの試料とも伝播時間と厚みには線形関係があり、その縦軸切片をこの計測回路内の遅れ時間と考えた場合、伝播時間と厚みには正比例の関係にあることがわかる。また表 5-1 に示すように、5mm 厚のリンゴ、ニンジン、寒天ゲルについて試料径を変えて伝播速度を計測した結果、径による変化は見出せなかった。従って、試料表面を伝わる波動などもあると考えられるが、板状試料においては試料内部を伝播する振動波を初動変化として検出しているものと考えられる。

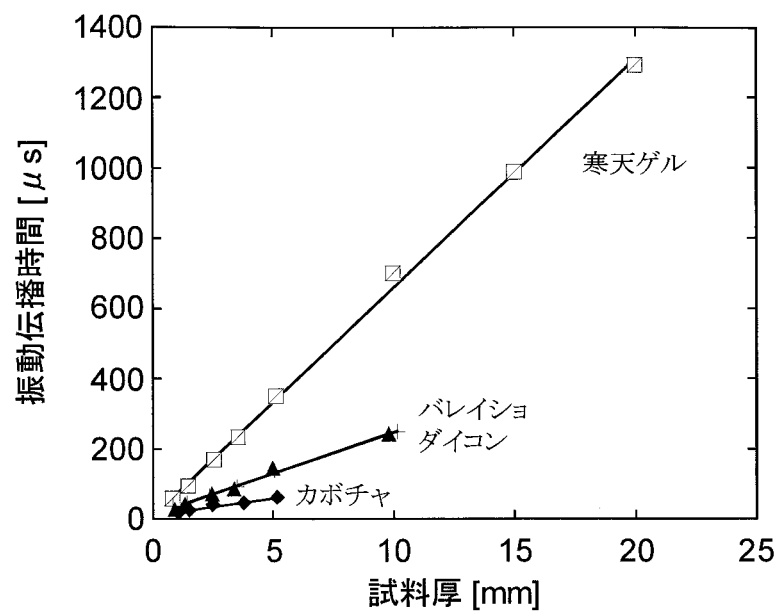


図 5-6 試料厚と振動伝播時間の関係

試料径: 38mm (試料厚 5mm 未満は 10mm 径)

□ 寒天ゲル (5.66%(w/w))	$y = 8.4 + 65.1x$, $r^2 = 0.985$
▲ バレイショ	$y = 9.9 + 24.2x$, $r^2 = 0.990$
+ ダイコン	$y = 13.2 + 23.4x$, $r^2 = 0.997$
◆ カボチャ	$y = 9.5 + 10.1x$, $r^2 = 0.960$

表 5-1 試料サイズが振動伝播速度に及ぼす影響

	振動伝播速度 [m/s]			超音波音速* [m/s]
	φ 38**	φ 21**	φ 10**	
リンゴ	37.3	37.4	36.5	180
ニンジン	47.4	47.3	47.2	1350
寒天ゲル***	14.6	14.8	14.5	1380

* : 共振周波数 140kHz の超音波センサで計測.

** : 試料径 (mm). 試料厚はすべて 5mm.

*** : 寒天濃度 5.66%(w/w).

5.2.3. 振動伝播速度と弾性率

表 5-1 中に、超音波振動子(140kHz 共振)を用いて計測した縦波超音波音速を示す。リング、ニンジン、寒天ゲルについて、それぞれ180, 1350, 1380m/sとなり、バイモルフ型振動子による振動伝播速度はその半分以下の大きさであった。水の縦波音速の実測値は1483m/s(20℃時)であるが、これは水の体積弾性率 K を 2.22GPa, 剛性率 G を零として無限媒体中の縦波音速式

$$c_l = \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(K + \frac{4}{3} G \right)}$$

に代入して得られる理論値 1490m/s とほぼ同じ値となる。ガスを含まない寒天ゲルについて考えた場合、その成分のほとんどが水であることから、体積弾性率 K は水の値とほぼ同じ大きさを持ち、また剛性率 G は零ではないものの、 K に比して極めて小さいため、その音速値は水の値とほぼ同じ大きさをとると考えられる。超音波実測値が約 1400m/s と、水の音速に近い値を取るのはこのためであると考えられる。しかし、バイモルフ型振動子による寒天ゲル中の振動伝播速度は 15m/s となり、明らかに無限媒体中の音速とは異なる値をとる。この値は、寒天ゲルと物性がよく似ているゼラチンゲルの表面波音速の約 1m/s¹⁵⁾にむしろ近いと考えられる。このことはこの振動を無限媒体中の縦波伝播として取り扱うことが適当でないということを示している。

第 2 章で述べたように、一般に棒(板)の振動は複雑であり、縦波振動のほかに横振動(湾曲振動)が現れやすく、またねじり振動も現れることもある¹³⁾。十分細い棒の縦振動伝播速度 c_d は $c_d = \sqrt{E/\rho}$ であらわされる。一方、横振動(湾曲振動)の振動伝播速度 c_f は Schaefer によれば

$$c_f = \sqrt{\pi a} \cdot \sqrt{f} \cdot \left(\frac{E}{\rho} \right)^{1/4}$$

(但し、 a :断面半径、 f :周波数= c_f/λ , λ :波長)となるという¹³⁾。また、ねじり振動の振動伝播速度 c_{tor} は $c_{tor} = \sqrt{G/\rho}$ であらわされる。いずれのモードにおいても、実際には振動波長と物体サイズとの関係による修正因子が必要であったり¹³⁾、横振動のように周波数依存性を示す場合があったりするものの、伝播速度は大略、ヤング率あるいは剛性率が支配的な因子となり、体積弾性率の関与はないと言える。

等方均一媒体では $E = 2(1+\nu)G$ (E :ヤング率、 ν :ポアソン比、 G :剛性率)が成立するが、農産物のポアソン比の変動範囲がおおよそ0.25から0.5の間である¹⁷⁾⁻¹⁹⁾ことを考慮すると、ヤング率は剛性率のおおよそ2.5倍から3倍の範囲内を変動するだけであり、近似的に弾性率における3倍則($E \cong 3G$)が成立する。

以上から、果菜類の棒状試料中を伝播するいずれのモードの振動であっても、ヤング率

よりも大きい体積弾性率の関与のない分、伝播速度は無限媒体中の縦波音速値よりも小さくなると考えられる。また、果菜類の硬さをヤング率で代表するとした場合、果肉が硬くなるほど、その伝播速度は増加する傾向をもつことが予想される。

第3節 円板状試料片を用いた実験

5.3.1. 実験方法

5.3.1.1. 実験試料及び整形法

組織内ガスを有する果菜類柔組織のモデルとして寒天ゲルに気泡を分散させたものと果菜類試料を用いて、バイモルフ型振動子によって励起された振動の伝播速度、内部ガス体積分率、準静的ヤング率の計測を行った。気泡分散寒天ゲルは前章と同様に、寒天ゲル中にアクリロニトリル製の中空カプセル球を分散させたものを、直径 10mm、厚さ 5mm の円板状に成形して各計測に供試した。果菜類試料についても前章と同じく、カボチャ(品種名:えびす南瓜)、ダイコン(青首)、サツマイモ(なると金時)、ナシ(20世紀)、リンゴ(ラリタン)、トウガン(なんぶ琉球)、スイカ(富士光)、ニンジン(品種不明)、バレイショ(男爵薯)を使用した。寒天ゲルの場合は同一ロットから、また果菜類の場合は同一個体組織中の近接する部位から直径 10mm、厚さ 5mm に成形した 3 枚の試料 A, B, C を作り、試料 A を大気圧下の準静的ヤング率計測、試料 B を加圧下の振動伝播速度計測、試料 C を密度及び組織内ガス体積分率計測に供試した。

5.3.1.2. 実験装置及び計測方法

(1) 実験装置

図 5-7 に計測系の概略図を示す。これは前章の計測系にバイモルフ型振動子による伝播速度計測部を追加したものである。図 5-8 に圧力チャンバと振動子を図示する。圧力チャンバへの高圧ガス導入部は縦波音速・弾性率計測部のガス導入部と共用しており、弁によりどちらか一方のガス連絡を断つような構造をとっている。また圧力チャンバとガス体積分率計測部はガス管を通じて連絡があり、加圧操作中も常に雰囲気圧が同一になるようにした。センサには一組の圧電バイモルフ型振動子(村田製作所製, PKF01A3, 変位 250 μ m/80V)を利用し、一方を送波子、他方を受波子とした。振動子ホルダ及び試料のセット方法は図 5-2 及び図 5-8 に示した通りである。送波子へは波形発生器(NF 回路設計ブロック製, 1940)より振幅 ± 500 mV, 1000 Hz の正弦波 1 波長分のバースト波を入力した。励起された振動が試料中を伝播し、送波子に対向して配置した受波子でこれを受信した。送受信信号はデジタルストレージオシロスコープ(横河電機製, DL1200)を経てコンピュータに転送した後、データ処理を行った。振動伝播速度計測部以外は前述の計測系を用いた。

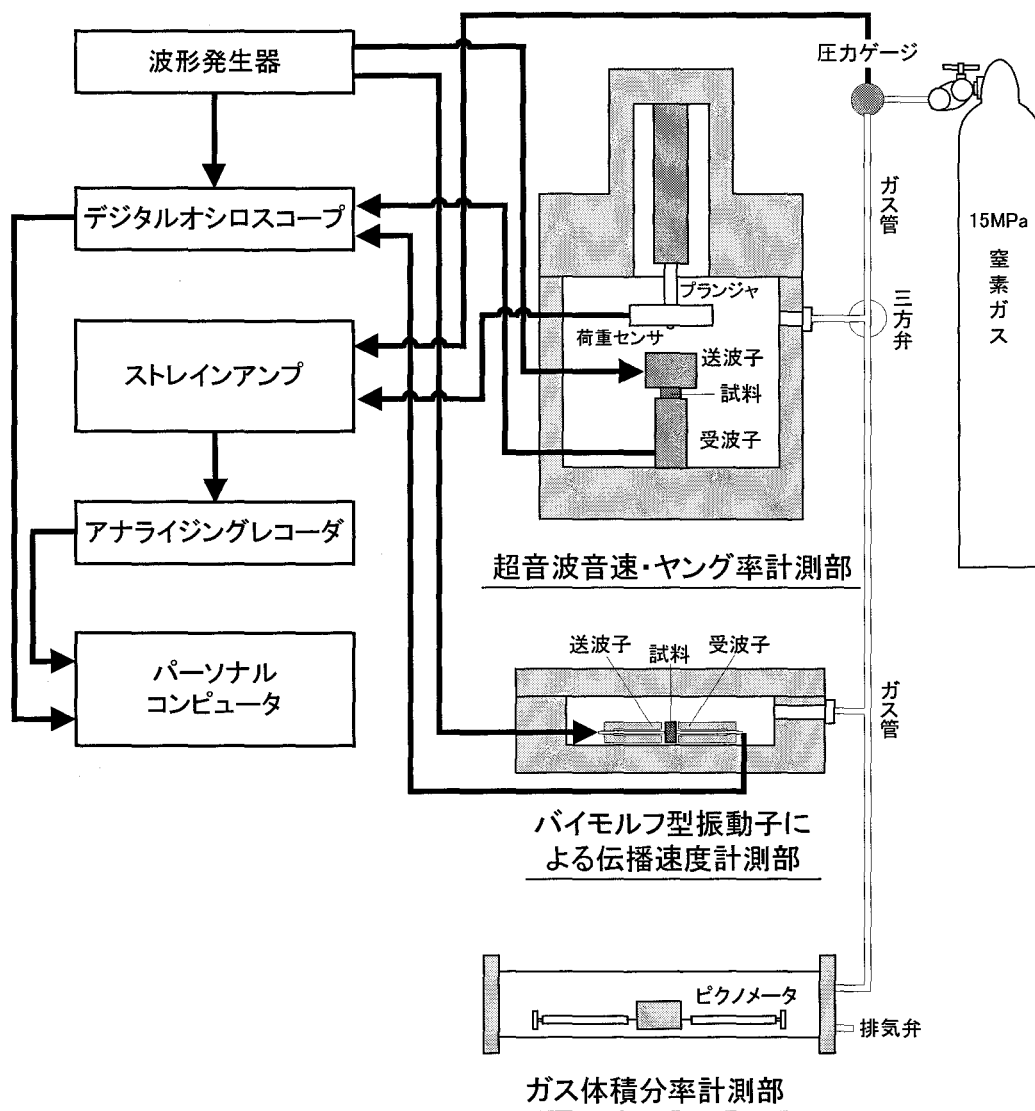


図 5-7 計測系の概略図

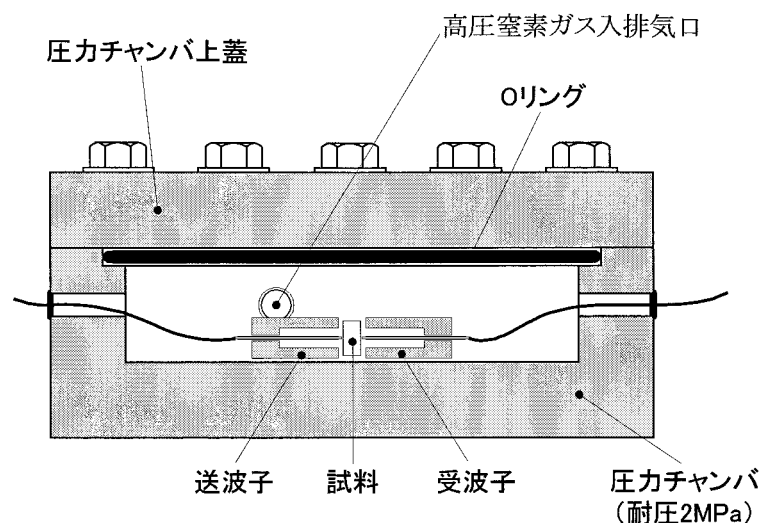


図 5-8 バイモルフ型振動子による伝播速度計測部

(2) 振動伝播速度計測

入力信号の立ち上がりから受波信号の初動までの時間を計測し、その時間からあらかじめ測定しておいた計測回路内遅れ時間を差し引いたものを振動伝播時間とし、別途レーザ変位計で計測した試料厚さをこの伝播時間で除して伝播速度を算出した。送受波子間に寒天ゲル試料をはさみ、振幅 $\pm 500\text{mV}$ 、 1000Hz の正弦波1波長分のバースト波を入力した時の受波信号の計測例は図 5-5 に既に示した通り。入力信号には、高周波成分が含まれるのを極力避けるため、矩形パルスの代わりに正弦バースト波を用いた。受波信号は SN 比の向上のため 256 回の同期加算を行った。図 5-5 の波形より入力信号と受波信号の立ち上がりの時間差を読み取ることができる。実際の計測回路では、計測系の持つ遅れ時間が存在するが、厳密にはグラフから読み取った時間差からこれを差し引く必要がある。そこで、本研究では、送受波子を十分延展したパラフィルムをはさんで対向させて計測したときに読み取った時間差を回路内遅れ時間 ($6.493\text{ }\mu\text{s}$) とした。

(3) ガス体積分率・みかけの弾性率計測

ガス体積分率、準静的ヤング率ともに前章と同様の方法で計測した。

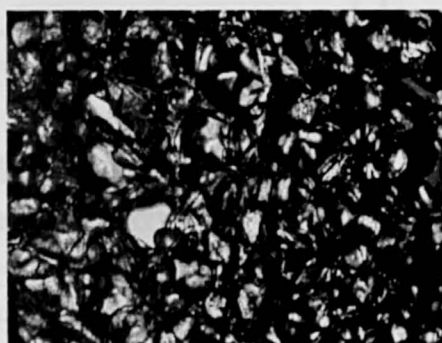
(4) 加圧下計測

本実験においても前章同様、振動伝播速度が組織内ガスより受ける影響を検討するために、加圧 (最大 1MPa まで) によって人為的に組織内ガス体積を減少させながら計測を行った。果菜類柔組織の超音波縦波計測実験では、加圧時の細胞間隙と雰囲気との通気を断つために、試料を封液に浸漬しながら加圧下計測を行ったが、同様の方法でバイモルフ型振動子を用いた予備実験を行ったところ、振動子の圧電素子が封液中を伝播してきた縦波

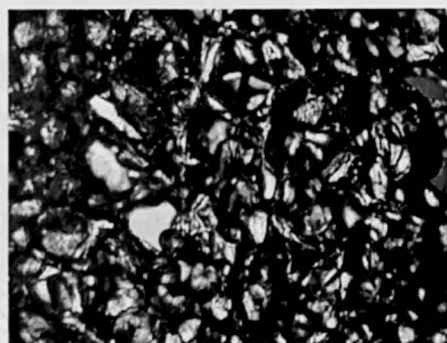
モードの振動に反応し、その信号が試料中の伝播信号に重畳して初動の特定が困難であった。封液を用いなければ縦波音速が信号に重畳しないため、封液に浸漬するかわりに十分に薄く延ばした不透水性高分子フィルム(パラフィルム)で試料を密封して加圧計測を行うこととした。

加圧操作によりガス体積が減少しているかどうか確認するため、リンゴ組織片を用いた顕微鏡観察を行った。図 5-9 に大気圧下及び加圧下の顕微鏡写真を示す。これは試料下面からの照明による透過画像であるが、細胞間隙中にガスがある部分では光が散乱するため、細胞内液で満たされた部分の透過光量と比較して光量が落ち黒く写る²⁰⁾。また試料を加圧することで圧縮性のガスの体積を大きく減少させ、それに伴う黒い部分の面積の減少を観察することでもガスの存在を確認することができる。図 5-9 より、封液のない試料片のガス体積は圧力を上げてほとんど変化していないが、パラフィルムで密封した試料片は組織内ガスの体積が加圧により減少しており、パラフィルム密封処理には封液と同等の効果があること

封液なし・無処理



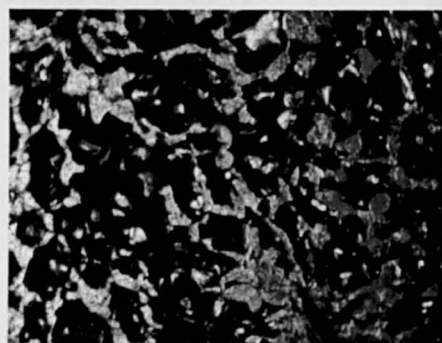
大気圧下



0.88MPa下

500μm

パラフィルムで被覆



大気圧下



0.88MPa下

500μm

図 5-9 パラフィルムで被覆したリンゴ片及び無処理のリンゴ片の実体顕微鏡写真

が確認できた。

(5) 実験手順

1 回の計測に必要な三つの試料が、計測中にどのように使用されるかという視点から、計測全体の流れをまとめたものを図 5-10 に示す。

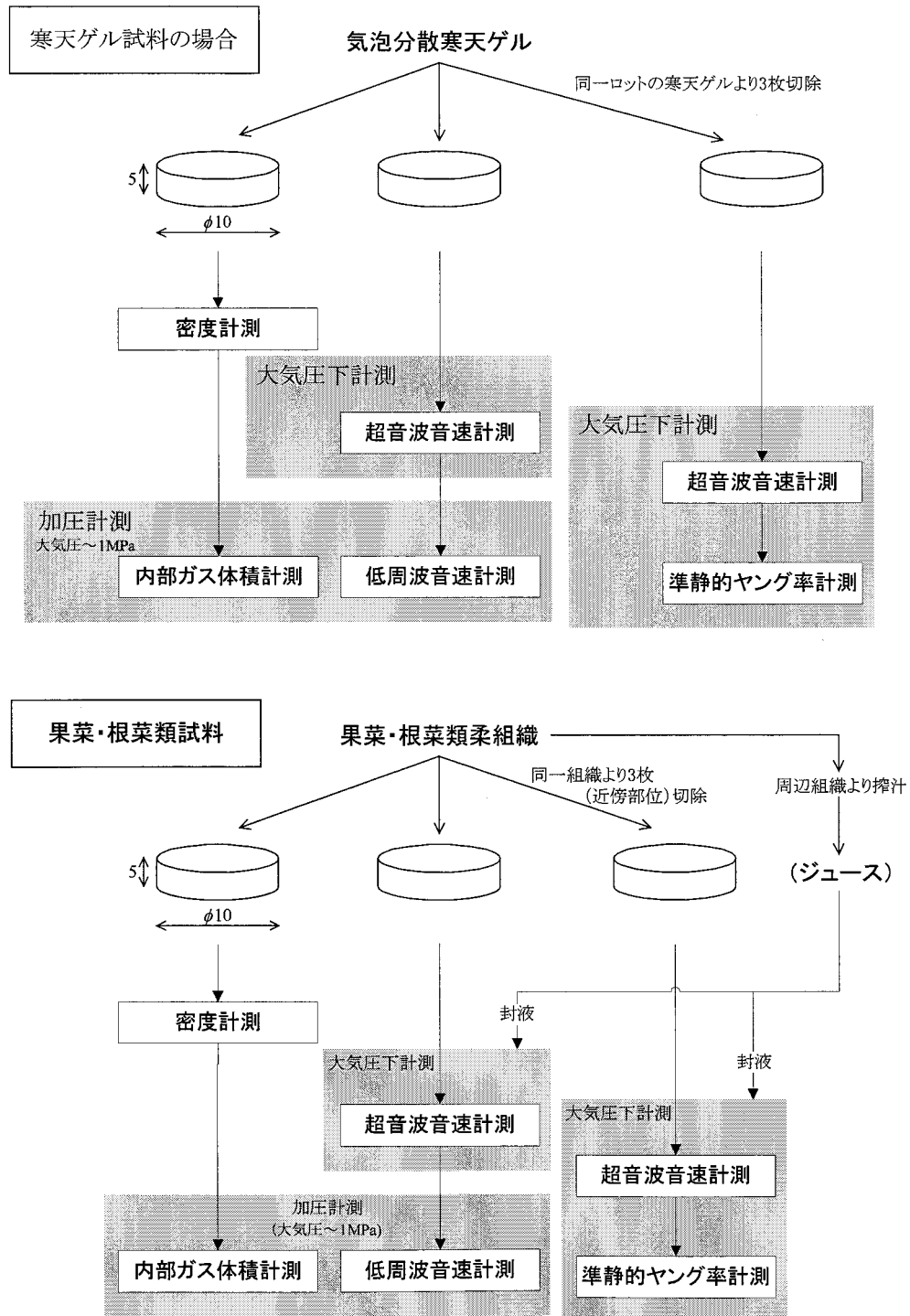


図 5-10 寒天ゲル及び果菜・根菜類試料を用いた実験の流れ

同一ロットの気泡分散寒天ゲル,あるいは同一の果実及び野菜より三つの試料(直径 10mm 厚さ 5mm)を切り出す. 果菜類試料の切除箇所は前章で示した通り. そして表面が乾かないように不透水性薄膜(パラフィルム)で密封しておく. 果菜類試料の場合は, 試料を切り出した近傍の果肉をミキサーで摩砕後, 遠心分離・濾過操作により不溶物を取り除いた果汁を準備する. 一つの試料をピクノメータに入れ, 置換媒体に蒸留水を用いた液体置換法により体積と密度の計測を行う. ピクノメータより試料を取り出し, 余分の水をペーパー(キムワイプ)で大まかに取り除いた後, 気泡分散寒天ゲルの場合は水, 果菜類試料の場合は準備しておいた果汁を封液として, 試料とともにガス体積計に入れて閉栓し, ガス体積計ごとガス体積分率計測用の圧力チャンバにセットする. 残る 2 試料のうち 1 試料をパラフィルムで密封したものを振動伝播速度計測部の送受波子にはさみ, 圧力チャンバの蓋を閉じる. そして大気圧下で振動伝播速度を計測した後, 圧力チャンバ内の圧力をレギュレータで調節しながら振動伝播速度の計測及びガス体積計の目盛りの読み取りを行う. 大気圧から 0.3MPa までは 0.05MPa 刻みで, その後 1MPa までは 0.1MPa 刻みで合計 12 ステップの加圧操作を行う. 1MPa に達したら振動伝播速度の計測を終了し, 三つ目の試料を超音波縦波音速計測部にセットし, 大気圧下で準静的弾性率の計測を行う. データはすべて制御用コンピュータに保存され, 実験終了後に, ガス体積分率, 振動伝播速度, 大気圧下の準静的弾性率を算出する.

5.3.2. 結果及び考察

5.3.2.1. 計測精度

無気泡寒天ゲルを用いた準静的ヤング率の繰り返し測定(標本数 9)の結果, 変動係数 3.6%を得た. また同様に振動伝播速度の繰り返し測定(標本数 54)を行った結果, 変動係数は 1.1%となった. 今回使用した気泡分散寒天ゲルの準静的ヤング率と振動伝播速度の測定値の分布幅がそれぞれ約 0.2~0.7MPa, 約 7~15m/sであることを考慮すると, 繰り返し測定の誤差はほとんど無視できると考えられる. また準静的ヤング率と伝播速度の測定値の分布幅が寒天ゲルより大きい果菜類試料についても, 同様に繰り返し測定誤差は無視できると言える.

5.3.2.2. 気泡分散寒天ゲルを用いた実験

(1) 大気圧下実験

17.2%(v/v)までの範囲でガスを分散させた寒天ゲルの振動伝播速度と準静的ヤング率の関係を図 5-11 に示す. 決定係数 r^2 は 0.978 となり, 両者の間には強い正の相関がみられ, ヤング率が大きくなると伝播速度も大きくなる傾向にあった.

一方, ガス体積分率がこの関係に及ぼす影響について明確な傾向を見出すことは出来なかった. さらに確認のために 0%(v/v)寒天ゲルの振動伝播速度を 1 としたときの気泡分散

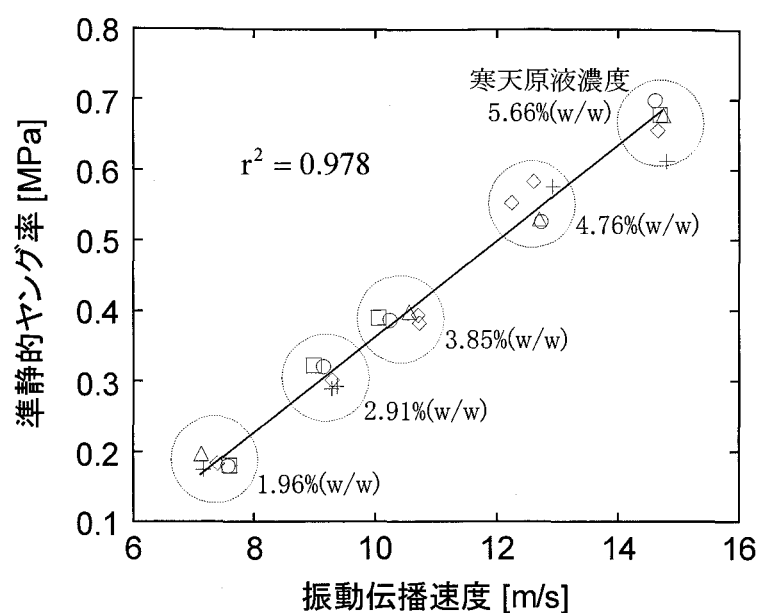


図 5-11 気泡分散寒天ゲルの準静的ヤング率と振動伝播速度

- 無気泡寒天ゲル
- 0～3%(v/v)のガスを内部に含む寒天
- ◇ 3～8%(v/v)のガスを内部に含む寒天
- △ 8～13%(v/v)のガスを内部に含む寒天
- + 13%(v/v)以上のガスを内部に含む寒天

表 5-2 気泡分散寒天ゲルのガス体積分率が振動伝播速度に与える影響

寒天濃度 [% (w/w)]	標本数	無気泡寒天の伝播速度を基準とした速度比	
		平均 [—]	変動係数 [%]
1.96	4	0.967	2.97
2.91	4	1.009	1.85
3.85	4	1.026	2.97
4.76	4	0.991	2.32
5.66	4	1.008	0.44
(全試料)	20	1.000	2.89

寒天ゲルの伝播速度の比を、寒天濃度別にまとめた結果を表 5-2 に示す。いずれの濃度においてもその平均はほぼ 1 であり、全試料での変動係数も 3% を下回った。

図 5-11 中の丸で囲んだ部分は同じ寒天原液濃度を意味するが、寒天原液濃度が増すと準静的ヤング率も増加する傾向にあった。しかし、同濃度の試料間で組織内ガス体積分

率が準静的ヤング率に与える影響を見出すことはできなかった。寒天濃度別に 0%(v/v)寒天ゲルの準静的ヤング率を基準にしたときの準静的ヤング率比を算出し、ガス体積分率との相関をみた場合、全試料で相関係数は 0.035 (非有意)となり、有意な相関を見出すことはできなかった。これは前節で述べたように、この低周波衝撃振動が有限媒体中の振動であると考えられるために、振動速度への体積弾性率の関与がほとんどなく、ヤング率あるいは剛性率支配であることから説明することが出来る。前章で述べたように、有限媒体では、いずれのモードであっても、振動速度はヤング率あるいは剛性率支配であり、体積弾性率の関与はほとんどないに等しい。仮に棒内の縦振動速度を考えた場合、音速式は $c_d = \sqrt{E/\rho}$ で表されるが、ヤング率が増加すると振動伝播速度が増加するという傾向をこの式から説明できる。また、ガス体積分率が振動速度—弾性率の関係に及ぼす影響を見出すことができなかったのは、前章で明らかにしたように、ガス体積分率は準静的ヤング率にほとんど影響を及ぼさないため、ヤング率支配である振動伝播速度にもほとんどガスの影響があらわれなかったと考えられる。

以上のことからガス体積分率が伝播速度に及ぼす影響はほとんどないと考えられる。また前章で述べたようにガス体積分率が体積弾性率に及ぼす影響が大きいことを考慮すると、バイモルフ型振動子による気泡分散寒天ゲル中の振動の伝播速度は少なくとも体積弾性率支配ではないと言えることができる。

(2) 加圧下実験

図 5-12 に気泡分散寒天ゲル(寒天濃度 1.96%(w/w))を約 1MPa まで徐々に加圧した時の振動伝播速度の変化について示す。無気泡寒天を除き、すべて加圧操作初期に伝播速度が減少し、約 0.2MPa から 1MPa までほぼ一定の値で推移した。これは他の寒天濃度でも同じ傾向にあった。大気圧下と加圧下の伝播速度の比についてまとめた結果を表 5-3 に示す。これより加圧操作により平均で約 5%程度伝播速度が減少していることがわかる。無気泡寒天ゲルの伝播速度変化についてはガスを含む試料と比較して小さく、ほぼ一定であるとみなせることから、ガス以外の部分の弾性率もほぼ一定であるとみなしてよい。従って伝播速度の減少は分散ガスの存在に起因すると考えられる。原因のひとつとして、マイクロカプセルの一部に内圧が若干陽圧であるものがあって、雰囲気圧が内圧を上回った時点でマイクロカプセル殻膜の張力がなくなり、カプセルのみかけの硬度が急激に低下することが考えられる。いずれにしても、この伝播速度の減少量は寒天原液濃度の違い、すなわち寒天ゲルのヤング率の違いによって変動する伝播速度の変動範囲 7~15m/s と比較すると小さいため、ガス体積分率が伝播速度に与える影響は準静的ヤング率が与える影響より小さいと言える。

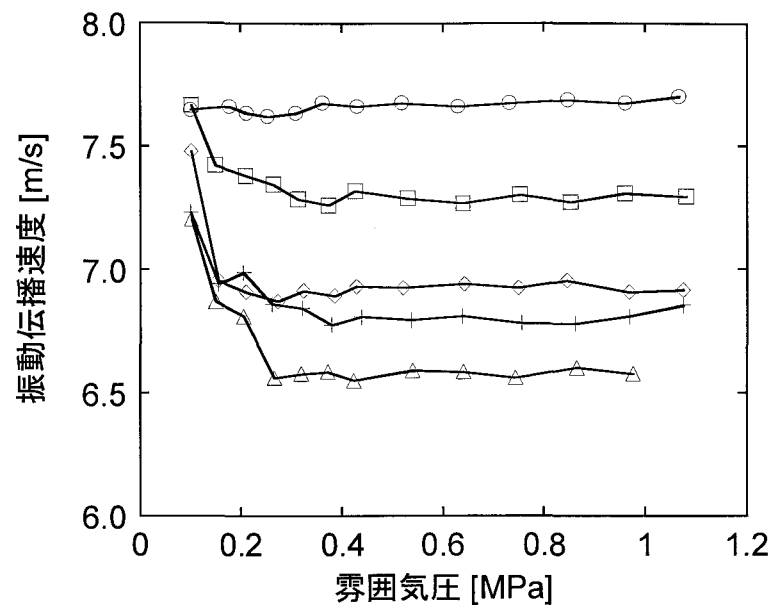


図 5-12 加圧下の気泡分散寒天ゲルの振動伝播速度

- 無気泡寒天ゲル
- 大気圧下のガス体積分率: 2.6%(v/v)
- ◇ 大気圧下のガス体積分率: 6.7%(v/v)
- △ 大気圧下のガス体積分率: 13.4%(v/v)
- ＋ 大気圧下のガス体積分率: 10.3%(v/v)

表 5-3 加圧操作が気泡分散寒天ゲルの振動伝播速度に与える影響

寒天濃度 [% (w/w)]	標本数	大気圧下の伝播速度に対する加圧下の値の比	
		平均 [—]	変動係数 [%]
1.96	59	0.95	3.22
2.91	59	0.938	4.73
3.85	59	0.955	2.93
4.76	59	0.963	3.35
5.66	57	0.945	3.82
(全試料)	293	0.95	3.73

棒内の縦振動速度 $c_d = \sqrt{E/\rho}$ からガス体積分率を考慮して導出した理論式は第3章の図 3-16 のようになり、ガス体積分率が 20%(v/v)まで変化しても振動速度は 8%程度の減少しか示さない。振動速度に体積弾性率が関与しているのであれば、図 3-9 で示すような体積弾性率の約 99%もの低下は振動速度を大幅に減少させると考えられるが、これでは実測結果と合致しなくなる。前章の図 4-21 からガス体積分率が約 16%(v/v)まで増加すると等温体積弾性率が 90%以上も減少することが既に確認されており、この点からも体積弾性率の振動速度への関与はほとんどないと言うことができる。

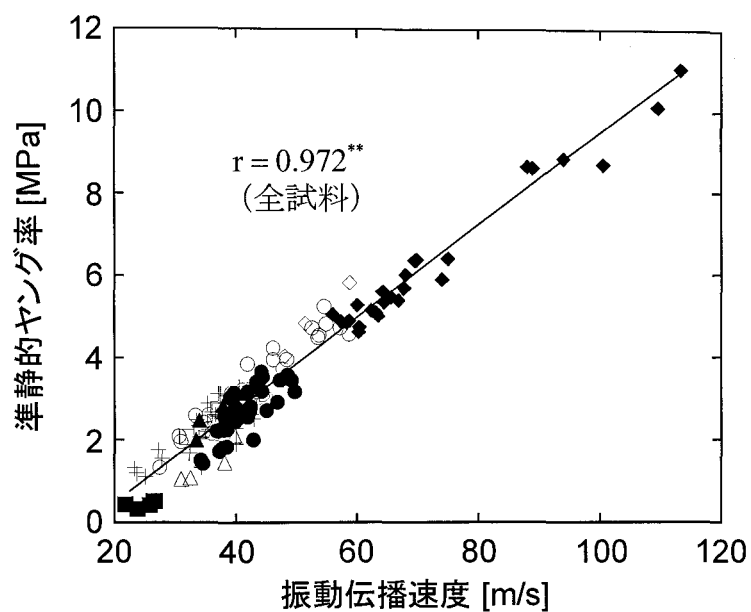
以上の大気圧下及び加圧下実験結果より、振動伝播速度は準静的ヤング率と線形関係にあり、その関係にガス含有率が与える影響は小さいこと、及びガス含有率が約 17%(v/v)までの範囲内では加圧処理によって伝播速度が大気圧時の値の平均 5%程度減少することが明らかになった。

5.3.2.3. 果菜・根菜類柔組織を用いた実験

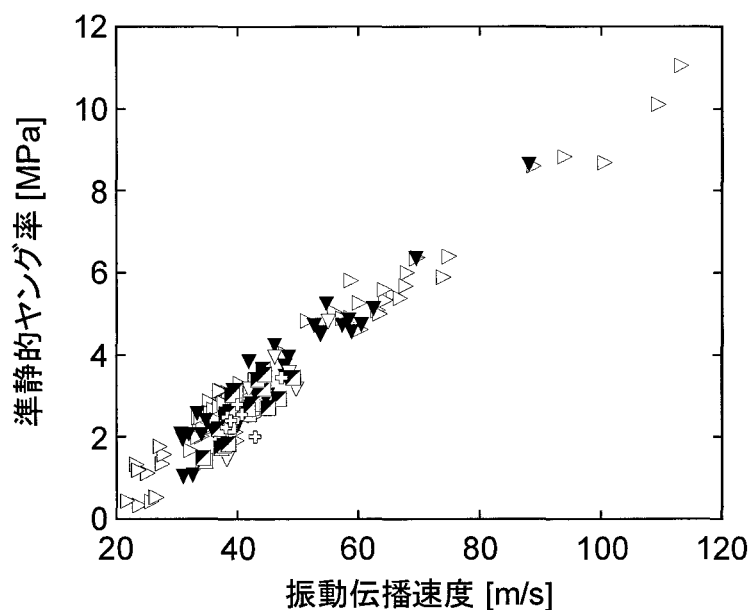
(1) 大気圧下実験

果菜類試料の準静的ヤング率と振動伝播速度の関係を図 5-13(a)に示す。全試料について両者の相関をみると、強い正の相関(決定係数 $r^2=0.944$)があり、寒天ゲルの結果同様、準静的ヤング率が大きくなると伝播速度も大きくなる傾向が確認できた。また種類別にみた場合、伝播速度や準静的ヤング率の変動範囲が全試料でみた場合よりも小さくなるため相関係数 r が小さくなる傾向にはあるものの、スイカを除き相関係数 r が 0.787~0.988 となり、総じて高い相関があると言える。次に準静的ヤング率と伝播速度の関係を、組織内ガス体積分率の大きさによって表示を変えてプロットしたものを図 5-13(b)に示す。このグラフからは、寒天ゲルの結果と同様、ガス体積分率が伝播速度と準静的ヤング率の関係に与える影響を見出すことができなかった。

次に振動伝播速度と組織内ガス体積分率の関係について図 5-14 に示す。決定係数 r^2 は 0.023 であり、有意な相関は見出せなかった。また、種類別にみた場合でも、カボチャとサツマイモ以外には有意な相関を見出せなかった。カボチャとサツマイモについては、相関係数 r は -0.424(5%水準で有意)、0.541(5%水準で有意)であったが、正負が逆となった。



(a) 果菜・根菜類の種類別プロット



(b) 組織内ガス体積分率別のプロット

図 5-13 果菜・根菜類試料の準静的ヤング率と振動伝播速度

● リンゴ $r = 0.787^{**}$	△ トウガン $r = 0.887^{*}$
◆ カボチャ $r = 0.981^{**}$	□ ナシ $r = 0.969^{**}$
○ サツマイモ $r = 0.940^{**}$	◇ ニンジン $r = 0.988^{**}$
■ スイカ $r = 0.587$	▲ パレイショ $r = 0.927^{**}$
+ ダイコン $r = 0.806^{**}$	(** : 1%水準で有意* : 5%水準で有意)
▷ 0~5%(v/v)のガスを内部に含む試料	■ 15~20%(v/v)のガスを内部に含む試料
▼ 5~10%(v/v)のガスを内部に含む試料	⊕ 20%(v/v)以上のガスを内部に含む試料
▽ 10~15%(v/v)のガスを内部に含む試料	

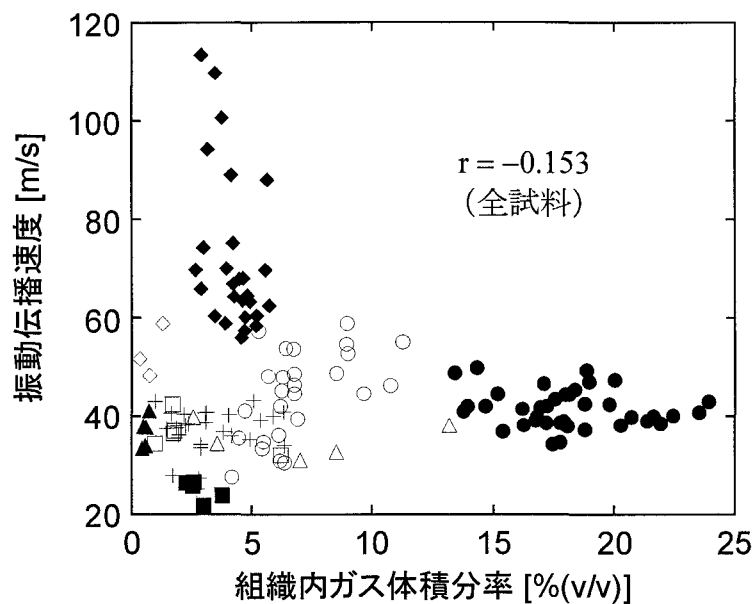


図 5-14 果菜・根菜類試料の振動伝播速度と組織内ガス体積分率

● リンゴ	$r = -0.176$	△ トウガン	$r = -0.049$
◆ カボチャ	$r = -0.424^*$	□ ナシ	$r = 0.580$
○ サツマイモ	$r = 0.541^{**}$	◇ ニンジン	$r = 0.720$
■ スイカ	$r = -0.633$	▲ バレイショ	$r = 0.796$
+ ダイコン	$r = 0.144$		

(** : 1%水準で有意* : 5%水準で有意)

(2) 加圧下実験

果菜類試料の振動伝播速度を加圧下で計測した結果、気泡分散寒天ゲルでの結果(図 5-12)と同様に、加圧初期に伝播速度が減少し、それから 1MPa までほぼ一定の値で推移する傾向がみられた。大気圧下の伝播速度値を基準とした加圧下の伝播速度比についてまとめた結果を表 5-4 に示す。種類によって異なるがおおよそ 3%~8%ほど伝播速度が減少した。しかしこの減少量も伝播速度の変動範囲 20~110m/s の大きさと比較すると小さいため、ガス体積分率が伝播速度に与える影響はヤング率が与える影響より小さいと言える。

大気圧下と加圧(約 1MPa)下で計測した時の振動伝播速度と組織内ガス体積分率の関係を図 5-15 に示す。ガス体積分率が約 20%(v/v)と他試料よりも高いリンゴを除いて、1MPa 下ではガス体積分率がほとんど零に近くなるため、加圧下のプロットは大気圧下の伝播速度のプロットがそのまま 0%(v/v)の方へ移動したような形となった。大気圧下の実験では相関係数の絶対値が 0.5 程度の相関をもっていたカボチャとサツマイモについては、加圧処理によるガス分率データ範囲の拡大により相関係数の大きさは減少したが、リンゴでは逆に増加した。全試料についてみた場合、相関係数 r は 0.055 となり、相関はほとんどみられなかった。また種類別にみた場合でも、有意な相関がみられないか、あるいは有意な相関係数が得られても約 0.3 以下の値をとるため、果菜類試料についても伝播速度に及ぼす組織内ガス体

積分率の影響は小さいものと考えられる。

表 5-4 加圧操作が果菜・根菜類試料の振動伝播速度に与える影響

果菜・根菜類試料	標本数	大気圧下の伝播速度に対する加圧下の値の比	
		平均 [—]	変動係数 [%]
リンゴ	404	0.915	3.59
カボチャ	313	0.955	2.91
サツマイモ	297	0.948	1.05
スイカ	60	0.950	1.19
ダイコン	297	0.959	1.89
トウガン	61	0.954	0.79
ナシ	38	0.963	1.36
ニンジン	36	0.968	1.22
パレイショ	60	0.973	1.00
(全試料)	1566	0.945	3.14

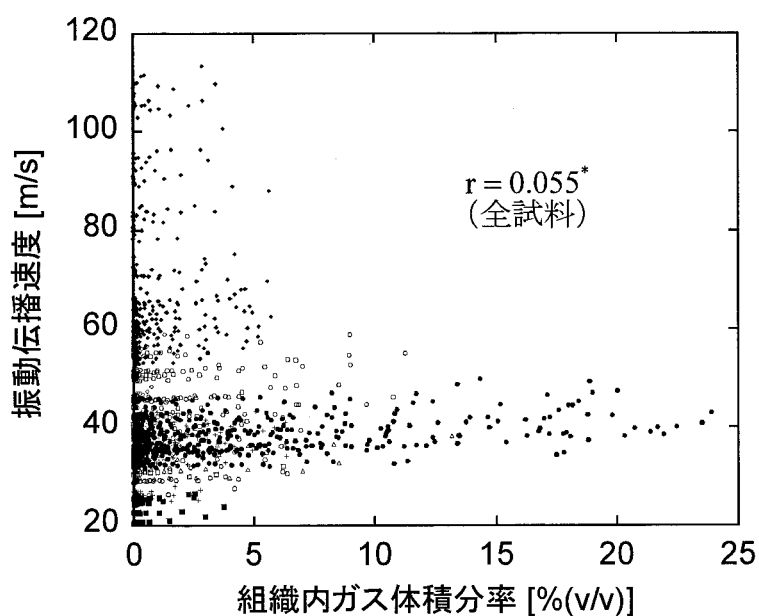


図 5-15 大気圧下及び加圧下の果菜・根菜類試料の振動伝播速度と組織内ガス体積分率

● リンゴ	$r = 0.281^{**}$	△ トウガン	$r = 0.116$
◆ カボチャ	$r = 0.023$	□ ナシ	$r = -0.208$
○ サツマイモ	$r = 0.164^{**}$	◇ ニンジン	$r = 0.305$
■ スイカ	$r = 0.107$	▲ パレイショ	$r = 0.231$
+ ダイコン	$r = 0.131^{*}$		

(** : 1%水準で有意* : 5%水準で有意)

5.3.3. まとめ

本章では果菜類に衝撃振動を励起したときの応答から硬さ・熟度などを知る、いわゆる打音法について、組織内ガスが振動伝播速度に与える影響、また振動伝播速度とみかけの弾性率の関係についてデータ計測を行い、有限媒体の振動伝播速度式及び2相分散系モデルから推察される事項を中心に計測結果の検討・考察を行った。

計測試料として、理想の2相分散系モデルに近い気泡分散寒天ゲルと、果菜類柔組織(カボチャ(品種名:えびす南瓜),ダイコン(青首),サツマイモ(なると金時),ナシ(20世紀),リンゴ(ラリタン),トウガン(なんぶ琉球),スイカ(富士光),ニンジン(品種不明),バレイショ(男爵薯))より切り出して整形したものをを用いた。

バイモルフ型振動子により気泡分散寒天ゲル及び果菜類柔組織小試料片に衝撃振動を与え、そのときの振動伝播速度を計測した。寒天ゲル、果菜類試料ともにバイモルフ型振動子で計測した振動伝播速度は、超音波振動子で計測した縦波音速の半分以下の大きさであった。寒天ゲルの超音波縦波音速が無限媒体中の縦波音速理論値とほぼ一致するのに対して、バイモルフ型振動子による振動伝播速度は約10分の1であることから、有限媒体近似の理論の適用が適当であることを明らかとなった。また、果肉硬さを代表すると考えられる準静的ヤング率及び組織内ガス体積分率もあわせて計測し、組織内ガスの含有率が伝播速度と準静的ヤング率に与える影響について検討を行った結果、以下の知見を得た。

- 1) ガス体積分率0~17%(v/v)、寒天原液濃度1.96~5.66%(w/w)の気泡分散寒天ゲルについて、準静的ヤング率と振動伝播速度との間に正の相関($r^2=0.978$)があった。
- 2) 気泡分散寒天ゲル中の振動伝播速度とガス体積分率の間に有意な相関を見出すことはできなかった。
- 3) 果菜類柔組織の準静的ヤング率と振動伝播速度との間に正の相関($r^2=0.944$)があった。
- 4) 果菜類柔組織中の振動伝播速度と組織内ガス体積分率との間に有意な相関を見出すことはできなかった。
- 5) 1MPa まで雰囲気圧を増加させながら振動伝播速度を計測したところ、気泡分散寒天ゲル、果菜類柔組織ともに、大気圧から約0.2MPaに至るまでに平均で約5~8%程度、伝播速度が減少し、その後1MPa までほぼ一定の値を保った。

果菜類の打音法などの低周波振動試験では、有限媒体理論式より振動伝播速度は組織内ガスの影響を大きく受ける体積弾性率支配ではなくヤング率支配となり、これは実測結果をよく表している。またヤング率、振動伝播速度ともに組織内ガスの影響は軽微であるために、果菜類のどの生育ステージにおいても振動伝播速度は硬さの指標となり得ると考えられる。これらのことは、振動伝播速度を硬さの指標とすることができるとした杉山ら⁷⁾⁻¹²⁾の報告結果とも合致した。

参考文献

- 1) Finney, E. E. : Dynamic elastic properties of some fruits during growth and development, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 12(4), pp.249-256 (1967)
- 2) Finney, E. E. : Random vibration techniques for non-destructive evaluation of peach firmness, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 16(1), pp.81-87 (1971)
- 3) 川村恒夫, 西村 功 : スイカの物性に関する研究(第1報), *農業機械学会誌*, 50(2), pp.85-92 (1988)
- 4) 中馬 豊, 志賀 徹, 疋田慶夫 : 振動・衝撃利用による果実の内部品質判定(第1報)—スイカ果実の共振周波数と内部組成—, *農業機械学会誌*, 39(3), pp.335-341 (1977)
- 5) Yamamoto, H., Haginuma, S. : Estimation of the dynamic Young's modulus of apple flesh from the natural frequency of an intact apple, *Report of National Food Research Institute*, 44, pp.20-25 (1984)
- 6) 陳 介余, 宮里 満, 石黒悦爾 : 振動特性による農産物の内部品質判定(第1報)—スイカの内部品質と振動周波数—, *農業機械学会誌*, 55(3), pp.65-72 (1993)
- 7) 杉山純一, 臼井支朗 : 打音信号によるマスクメロンの非破壊品質評価, *計測自動制御学会論文集*, 26(4), pp.367-374 (1990)
- 8) Sugiyama, J., Otake, K., Hayashi, S., and S. Usui. : Firmness measurement of muskmelons by acoustic impulse transmission, *Transactions of the ASAE*, 37(4), pp.1235-1241 (1994)
- 9) 杉山純一 : メロンの携帯型非破壊果肉硬度計の開発と成長計測, *フレッシュフードシステム*, 26(9), pp.22-27 (1992)
- 10) Sugiyama, J., Katsurai, T., Hong, J., Koyama, H. and K. Mikuriya. : Melon ripeness monitoring by a portable firmness tester, *Transactions of the ASAE*, 41(1), pp.121-127 (1998)
- 11) 杉山純一 : 打音によるメロンの非破壊計測—その原理から携帯用果肉硬度計の開発まで—, *農業及び園芸*, 73(2), pp.238-246 (1998)
- 12) Sugiyama, J. : Application of non-destructive portable firmness tester to pears, *Food Science and Technology Research*, 7(2), pp.161-163 (2001)
- 13) 能本乙彦 : 固体中の超音波(I)超音波の振動数における固体の固有振動, *日本音響学会誌*, 9(1), pp.3-32 (1953)
- 14) 木村正雄, 川島さゆり : 砂中の横波音速深度特性, 第15回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム講演予稿集, pp.15-16 (1994)
- 15) 崔 博坤 : 表面波でやわらかい物質を調べる, *日本音響学会誌*, 56(6), pp.445-450, 2000
- 16) 福原幹夫 : 私信

- 17) Mohsenin. N. N. 著, 林 弘通 監訳 : 食品の物性, 光琳, pp.203-204 (1982)
- 18) 石橋貞人 : 青果物の力学的性質の負荷速度依存性, 農産物性研究(第 1 集), 農業機械学会編, pp.66-67 (1979)
- 19) 石橋貞人 : 青果物の力学的特性, 農産物性研究(第 2 集), 農業機械学会編, pp.64-65 (1985)
- 20) Vincent J. F. V. : Relationship between density and stiffness of apple flesh, Journal of the Science of Food and Agriculture, 47, pp.443-462 (1989)

第6章 総括

本論文は果菜・根菜類柔組織の組織内ガスが、その弾性率、振動伝播速度に与える影響について理論及び実験による検証の両面から検討することを目的においた。まず理論面については、果菜・根菜類柔組織を、水の物性に極めて近い母材(連続相, マトリックス)にガス小粒子が均一に分布した2相分散系と仮定し、主に弾性率とガス体積分率の関係を元に音速と組織内ガス体積分率の関係式を導いた。また、入力音響波として超音波を用いた場合といわゆる打音法で発生する低周波を用いた場合とでは、音速に及ぼす弾性率の影響が異なることを示した。実証面では、超音波振動子とバイモルフ型振動子を用いて、それぞれ高周波、低周波域での振動伝播速度を計測し、さらに同一試料の組織内ガス、みかけのヤング率を計測し、理論式から推測されるそれらのパラメータの関係についての検証を行った。

第1章では、農産物の果肉硬度が摂食時の官能にとって重要な位置を占めることを、消費者意識調査及び文献を元に論じた。そしてこれまで行われてきた非破壊的な硬度計測法を入力物理量によって、「衝撃荷重法」「打音解析法」「超音波法」「近赤外分光法」に分類し、それぞれの方法と特徴について論じた。そして、力に対する応答という硬さの定義に近く、かつ農産物に損傷を与える可能性の少ない「打音解析法」「超音波法」に代表される音響法が優れており、中でも、振動伝播速度をパラメータにすることで農産物の形状や大きさに影響を受けずに硬さ等の物性値が推定できる可能性を示し、打音法と超音波法では硬さと音速の相関が大きく異なることを過去の研究例を引いて説明した。さらにこの原因は柔組織内の細胞間隙中に存在しているガスが影響を及ぼしている可能性があるという仮説の提起を行った。

第2章では、弾性率と音速の間の関係について理論式の導入を行い、さらに果菜・根菜類柔組織に適用する場合に注意すべき点について考察を加えた。

まず、ものの「かたさ」に関する一般的な定義について整理し、農産物の硬さについても工業用材料の定義と同じく、一定の変形をもたらすのに必要な力という定義が農業工学、食品科学分野において一般的であることから、本研究では農産物の硬さとして圧縮試験によって得られるみかけの弾性率を用いることを述べた。

次に、振動を伝播する媒体を無限媒体と有限媒体の二つの場合に分けて、弾性率と振動伝播速度との間の一般的な関係式について説明し、媒体によって関係式が異なることを論じた。完全な無限媒体は存在し得ないが、100kHz程度の超音波伝播を考えた場合、果菜・根菜類柔組織中での波長が数mm程度になり、事実上果菜・根菜類の実を無限媒体として扱うことができる。ところが、打音法に代表される数kHz以下の可聴域の場合、その波長は超音波よりも大きくなり、もはや無限媒体としての近似が困難になり有限媒体としての扱いとなる。

音速理論式を簡単化するため、媒質は等方均一性の弾性体であるという仮定をおいた。無限媒体近似においては、振動伝播速度を支配する弾性率が体積弾性率であり、縦波という粗密波が引き起こす圧力変動に対する体積変動を担うのは、柔組織の主成分たる水分であるため、この意味で均一性、等方性が仮定できるとした。一方、柔組織中には体積弾性率が水に比して極めて大きい組織内ガスが分散しているため、これが均一に分散しているという条件下でのみ統計的均一性が成立するとした。

さらに、農産物は一般的に粘弾性体であるため、線形粘弾性体中の振動伝播速度と粘弾性特性の複素量による関係式について概説した。そして超音波音速と減衰に関する過去の測定例を元に計算した結果と、振動伝播に伴う散逸エネルギーについて、果菜類の熱特性から計算した結果から、本研究では複素関係式の虚部を零として近似することとし、この近似式は弾性体近似による関係式と同形になることを論じた。

有限媒体においても、以上の均一性、弾性体近似については同様に成り立つものの、等方性については、繊維分の走向によるヤング率や剛性率の異方性が報告されていることから、考慮すべき事項であるとした。

以上の近似を踏まえて、音速と弾性率の間に成立する理論式を考察した結果、無限媒体近似となる超音波法では、その縦波音速は体積弾性率支配であり、硬さを代表するヤング率が音速に及ぼす影響はほとんどないことが推定されること、また有限媒体中の振動の扱いとなる打音法では、その振動音速は、振動モードや周波数により音速値は異なるものの、同一形状をした同じ品種の農産物においては、振動伝播速度はヤング率・剛性率が支配的なパラメータとなり、速度から逆に硬さを推定できる可能性があることを論じた。

第 3 章では、細胞間隙中に存在するガスが果菜・根菜類柔組織のみかけの弾性率や振動伝播特性にどのような影響をもたらすのか、分散系理論に基づいて考察を行った。

まず、果菜・根菜類柔組織の組織構造について概説し、組織内ガスは呼吸・生理活動に利用・生産されるガスのことで、主として細胞間の間隙に存在していることを説明した。柔組織の組成を体積パーセントで考えた場合、組織内ガスは品種によっては水に次いで多い成分であり、非圧縮性の水に圧縮性のガスが分散すると、体積弾性率をはじめとする弾性率に与える影響は無視できないことを論じた。

次に、柔組織について、水を主体とする細胞実質部にガス小粒子が分散した 2 相分散系でモデル化し、岡野や矢野による分散系の物性値に関する理論を適用して、組織内ガスが個々の弾性率に与える影響について考察を行った。その結果、ガス体積分率が増すと、弾性率はいずれも減少傾向を示すが、減少割合が弾性率により異なることが予想されることを明らかにした。仮に細胞実質部に水の物性値を当てはめて考えた場合、ガス体積分率が零から 20%(v/v)に増加すると、ヤング率、剛性率は約 30%の減少が予測されるのに対して、体積弾性率は 99%も減少することが予測された。

この関係式を、無限媒体、有限媒体の音速理論式に適用し、音速とガス体積分率の関係について考察を行った。無限媒体近似の縦波音速は、体積弾性率支配であるために、ガス

体積分率が零から20%(v/v)に増加すると、約88%も減少する一方、有限媒体中の棒速度は約8%の減少にとどまることが明らかとなった。このことから、高周波数の超音波利用では組織内ガスの影響を大きく受けるために硬さの情報は得られにくい、低周波の打音法ではガスの影響が小さくなり硬さ情報が超音波よりも顕著になる可能性があるとした。

第4章では、前章で述べた無限媒体近似での縦波音速と各種弾性率の係数に及ぼす内在ガス体積分率の影響に関する理論式を、実測データを用いて比較検討し、モデルの適用性の検証及び実験結果から得られる知見の整理を行った。

計測試料として、理想の2相分散系モデルに近い気泡分散寒天ゲルと、果菜・根菜類柔組織(カボチャ(品種名:えびす南瓜),ダイコン(青首),サツマイモ(なると金時),ナシ(20世紀),リンゴ(ラリタン),トウガン(なんぶ琉球),スイカ(富士光),ニンジン(品種不明),バレイショ(男爵薯))より切り出して直径10mm厚さ5mmのサイズに整形したものを用いた。共振周波数140kHzの超音波センサを送受波子として、パルス入力から受信までの時間で試料厚を除することにより縦波音速を決定した。また、試料内ガスの体積定量には1MPaまでの加圧法を用いて決定した。

計測の結果、気泡分散寒天ゲルと果菜・根菜類柔組織に共通して以下の知見を得た。

- 1) 超音波縦波振動の伝播速度はガス体積分率の影響を大きく受け、ガス体積分率が大きいほど速度は低下する。
- 2) ガス体積分率が零に近い場合、縦波音速は1400m/s程度で、水の音速値1483m/s(20℃時)に近づく。
- 3) ガス体積分率が大きくなるにつれて音速減少率は鈍化し、音速の最低値は百数十m/s程度となった。
- 4) 超音波縦波振動の伝播速度は体積弾性率支配である。また体積弾性率はガス体積分率が大きくなるほど減少するために、伝播速度もまた減少する。
- 5) 伝播速度に及ぼすヤング率の影響は、体積弾性率と比較して無視できるほど小さい。

さらに、果菜・根菜類試料については次の知見を得た。

- 1) 組織内ガス体積分率と密度には負の相関があり、非デンプン質組織では高い相関($r = -0.981$)を持つ線形関係が見られる。
- 2) 超音波縦波音速から、組織の密度、あるいは組織内ガス体積分率が推定できる可能性がある。

第5章では、第3章で述べたように有限媒体中の各種音速はヤング率支配であり、またこの関係は組織内ガスの影響を受けにくいという予想について、実測データを用いた検討を行い、さらに実験結果から得られる知見を整理した。

計測試料として、前章と同様に、理想の2相分散系モデルに近い気泡分散寒天ゲルと、果菜・根菜類柔組織(カボチャ(品種名:えびす南瓜),ダイコン(青首),サツマイモ(なると

金時), ナシ(20 世紀), リンゴ(ラリタン), トウガン(なんぶ琉球), スイカ(富士光), ニンジン(品種不明), バレイショ(男爵薯))より切り出して直径 10mm 厚さ 5mm のサイズに整形したものをを用いた. バイモルフ型振動子を利用して共振周波数 500Hz 程度の低周波振動センサを試作し, 正弦半波信号(1000Hz)を入力波として, 受信までの時間で試料厚を除することにより低周波振動速度を決定した. また, 試料内ガスの体積定量には 1MPa までの加圧法を用いて決定した. 計測の結果, 気泡分散寒天ゲル, 果菜・根菜類柔組織ともに, 準静的ヤング率と振動伝播速度との間に正の相関($r^2 \geq 0.94$)があり, そして振動伝播速度とガス体積分率の間に有意な相関を見出せないことを明らかにした.

このことから, 柔組織の低周波振動伝播速度は準静的ヤング率と強い正の相関関係にあり, その関係に及ぼす組織内ガスの影響は小さい上, またガス含有率に大きく左右される体積弾性率の影響もほとんどないと推定できることから, その伝播速度はヤング率支配であるとの結論を得た. このことは, この伝播速度が果菜類柔組織の硬さについて果菜類の種類や組織内ガス含有量に影響されない指標となり得ることを示唆する. また, 農産物全姿での衝撃応答計測においても, 組織内ガスが振動伝播速度に及ぼす影響は極めて小さい可能性があるということが推定される.

以上を総括すると, 音響伝播速度による硬度評価を行うためには打音法に代表される低周波振動が適すると結論できる. また超音波の縦波音速は, 硬度情報よりもむしろ, 組織内ガス量や密度の計測に適しており, 鬆(す)の有無の判定や, 収穫前後や貯蔵中の組織内ガス量のモニタリングによる生理状態判別への利用などが考えられる.

謝 辞

本論文は、京都大学大学院の修士課程在学中に着手し、京都大学大学院農学研究科農産加工学分野の助手に着任してからも継続して行ってきた研究の成果をとりまとめたものです。本研究の遂行と本論文のとりまとめには、多くの方々より多大なご指導、ご協力を賜りました。

特に、京都大学大学院農学研究科 池田善郎教授には、本研究を進めるに当たり終始懇篤なご指導と適切なご助言を賜りました。慎んで深謝申し上げます。

京都大学大学院農学研究科 笈田 昭教授、同 梅田幹雄教授には、本論文のとりまとめに際して、ご多忙の中、大変有益なご助言とご指導を賜りました。ここに心よりお礼申し上げます。

山下律也京都大学名誉教授には、ご退官後も暖かいお言葉をかけていただき、大変励みになりました。

京都大学大学院農学研究科 加藤宏郎助教授には、研究室ゼミの場で大変示唆に富んだご意見を賜りました。また同僚の森尾吉成元助手(現 三重大学生物資源学部助手)から手ほどきを受けた Windows プログラミングと日々の議論は研究全般に大変役立ちました。

研究室卒業生の平澤 太君(現 日清製粉)、石井洋平君(現 三洋電機)、後藤 裕君(現 生物系特定産業技術研究推進機構)、菌部博則君(現 東芝)、河渕優子さん(現 GE 横河メディカル)、松田綾爾君(現 横河電機)達と卒業研究指導を通じて行った議論は、本研究の遂行に大変有意義なものでした。

京都大学大学院農学研究科附属農場の故 片岡丈彦元助手、鉄村琢哉元助手(現 宮崎大学助教授)には、本研究で用いた果実試料の手配に便宜を図っていただき、さらに果樹園芸学上の知見を数多く与えていただきました。

東芝タンガロイの福原幹夫博士には、生物体試料中の超音波伝播現象について重要なお指摘を賜りました。

独立行政法人食品総合研究所 杉山純一博士、国立台湾大学 盧 福明教授、大阪府立大学大学院農学生命科学研究科 平井宏昭講師には、実験データや図表の引用をこころよくご承諾くださいました。また光琳、実教出版、東京大学出版会、日刊工業新聞社、日本音響学会、日本食品科学工学会、養賢堂、流通システム研究センターの各社・各団体の出版ご担当者には、出版物からの図表転載に格別のご配慮をいただきました。

以上の皆様に心よりの感謝の意を表したいと思います。

最後に、実験・論文作成のために何かと迷惑をかけてきたにも関わらず、常に応援してくれた妻と子供達、そして両親に感謝いたします。